

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Dalibor Brunclík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

Analyzátor elektrického výkonu pro nesinusové
průběhy napětí a proudu
Electrical Power Analyser for Non-sinusoidal Voltages
and Currents

2014

Dalibor Brunclík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Dalibor Brunclík**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Analyzátor elektrického výkonu pro nesinusové průběhy napětí a proudu**
Electrical Power Analyser for Non-sinusoidal Voltages and Currents

Zásady pro vypracování:

Pro nesinusové průběhy napětí a proudů zjednodušeně neplatí klasický trojúhelník výkonů a existuje celá řada teorií, jak s nastalou situací nakládat. Bakalářská práce se zabývá realizací analyzátoru výkonů na bázi virtuální instrumentace, který vypočítává výkony dle řady zveřejněných teorií a také dle standardu IEEE 1459.

Body zadání:

1. Teoretický rozbor metod výpočtu výkonů: Budeanu, Fryze, Kusters&Moore, Shepherd&Zakikhani, Sharon, Czarnecki, IEEE1459.
2. Rozbor problematiky měřicího řetězce.
3. Návrh a implementace.
4. Ověření funkce a přesnosti.
5. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] IEEE Std. 1459-2010. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010. PDF: ISBN 978-0-7381-6058-0 STD95967, Print: ISBN 978-0-7381-6059-7 STDPD95967.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013
Datum odevzdání: 07.05.2014

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval pánu doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za praktickou pomoc s vypracováním této bakalářské práce, což obnášelo vybrání vhodných literárních zdrojů a vyvinout vhodné algoritmy pro softwarovou část virtuálního měřicího přístroje. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole a podporovala mě během studií.

V Ostravě dne 7. 5. 2014



Dalibor Brunclík

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem obsahu harmonických složek v průbězích proudu a napětí, na výpočet výkonových veličin elektrického obvodu. Jedná se zejména o tyto veličiny: činný výkon, zdánlivý výkon, jalový výkon, neaktivní výkon a deformační výkon. V této práci je rozebráno několik definic, které navrhuji, jak vzniklou situaci řešit. Součástí této bakalářské práce je také virtuální měřicí přístroj vyvinutý v prostředí LabVIEW, který na základě jednotlivých definic vypočítává dané veličiny z naměřených hodnot proudu a napětí.

Klíčová slova

Činný výkon, zdánlivý výkon, jalový výkon, neaktivní výkon, deformační výkon, účinník, LabVIEW, měření, harmonické průběhy, periodické průběhy, harmonické složky.

Abstract

The bachelor thesis deals with impact of waveforms of current and voltage with higher harmonics on calculating power quantity of an electrical circuit. It is primarily these quantities: active power, apparent power, reactive power, non-active power and distortion power. In this thesis, these are several definitions that propose how to resolve this problem. A virtual measurement device, developed in LabVIEW, is a sub-part of this thesis and it calculates these quantities from measured values of current and voltage according to these definitions.

Key words

Active power, apparent power, reactive power, non-active power, distortion power, power factor, LabVIEW, measurement, sinusoidal waveforms, periodical waveforms, harmonics.

Obsah

1. Úvod	2
2. Vybrané termíny týkající se měření výkonů	3
3. Výpočet výkonových veličin za sinusových podmínek	4
4. Způsoby výpočtu výkonových veličin za periodických podmínek	6
4.1 Definice podle C. Budeana	6
4.2 Definice podle S. Fryze	7
4.3 Definice podle W. Shepherd a P. Zakikhaniho	8
4.4 Definice podle Sharona	10
4.5 Návrh standardu IEEE 1459	11
5. Vývoj softwaru	14
5.1 Úvod do virtuální instrumentace	14
5.2 Vývojové prostředí LabVIEW	15
5.3 Základní návrh analyzátoru pro měření výkonu.....	16
5.4 Zobrazování vektorových diagramů	18
5.5 Vykreslení průběhů proudu a napětí, zobrazení spekter	21
5.6 Měření reálného signálu	22
6. Testování virtuálního měřicího přístroje	25
6.1 Výsledky testování offline analýzy - generátor	25
6.2 Výsledky testování off-line dat – naměřené průběhy.....	28
6.3 Měřicí etalon Omicron CMC 256+	29
6.4 Výsledky testování online analýzy – měření z karty.....	30
7. Závěr.....	36
Použitá literatura.....	37
Seznam příloh.....	37

1. Úvod

Za ideálních podmínek by v napájecí síti mělo být střídavé napětí harmonického průběhu o hodnotě 230 V a frekvenci 50 Hz. Jak je ale známo, velikost skutečného napětí značně kolísá vlivem stále se měnícího stavu distribuční soustavy. Indukční a kapacitní charaktery zátěže způsobují, že proud není ve fázi s napětím a tím vznikají jalové výkony. Zavedení polovodičových prvků do spotřebičů navíc vedlo k deformaci proudu s následkem zkreslení průběhu napájecího napětí. Tyto polovodičové prvky, jako jsou například diody a tyristory, totiž umožňují vést proud pouze po určitý úsek periody, a tak vzniká neharmonický průběh proudu. Díky znalosti zatěžovacích charakteristik víme, že velikost odebíraného proudu ovlivňuje velikost samotného napájecího napětí v závislosti na vnitřní impedanci zdroje. A deformací průběhu napětí dochází k deformaci průběhu proudu. To v praxi znamená, že průběhy napětí a proudu již neobsahují pouze základní harmonické složky s frekvencí 50 Hz, ale obsahují také harmonické složky s násobky frekvence základní harmonické složky.

Pokud tedy v praxi chceme stanovit velikost činného, zdánlivého a jalového výkonu, musíme zohlednit to, že máme k dispozici pouze periodický, nikoli harmonický, průběh napětí a proudu. Existuje celá řada definic, které navrhují, jak s touto situací nakládat v případě výpočtu výkonů. Některé z nich jsou obsaženy v kapitole 4.

Tato bakalářská práce se dále zabývá vývojem virtuálního měřicího přístroje, který byl vytvořen v prostředí LabVIEW. Na základě naměřených průběhů proudu a napětí tento přístroj počítá výkony a další veličiny.

2. Vybrané termíny týkající se měření výkonů

Dle (1) a (2) jsou v této části definovány některé termíny (česky a anglicky), které mají přímou souvislost s touto bakalářskou prací. Pro přehlednost uvádím tabulku termínů, viz Tab. 1.

Tab. 1: Vybrané termíny z normy, tabulka převzata ze zdroje (1).

Č. položky	Termín	Značka	Definice
131-11-30	okamžitý výkon <i>instantaneous power</i>	p	u dvojpólového prvku nebo obvodu součin napětí u mezi póly a proudu i prvku nebo obvodu; (W)
131-11-41	zdánlivý výkon <i>apparent power</i>	S	součin efektivní hodnoty napětí U mezi póly a efektivní hodnoty proudu I dvojpólového prvku nebo obvodu; (V·A)
131-11-42	činný výkon <i>active power</i>	P	při periodických podmínkách střední hodnota okamžitého výkonu p po dobu jedné periody (při dvoupólových sinusových podmínkách $P = S \cdot \cos \varphi$); (W)
131-11-43	neaktivní výkon <i>non-active power</i>	Q_{\sim}	neaktivní výkon pro lineární dvojpólový prvek nebo obvod (při dvoupólových sinusových podmínkách $Q = S \cdot \sin \varphi$); (var)
131-11-45	var <i>var</i>	<i>var</i>	zvláštní název pro voltampér v případě neaktivního a jalového výkonu
131-11-46	účinník <i>power factor</i>	λ	při periodických podmínkách podíl absolutní hodnoty činného výkonu P a zdánlivého výkonu S (při dvoupólových sinusových podmínkách $\lambda = \cos \varphi$)
131-11-48	úhel fázového posunu <i>phase displacement angle</i>	φ	při sinusových podmínkách úhel fázového posunu mezi napětím lineárního dvojpólového prvku nebo obvodu a jeho proudem
131-11-49	účinník, $\cos \phi$ <i>active factor</i>		u dvojpólového prvku nebo obvodu při sinusových podmínkách podíl činného výkonu P a zdánlivého výkonu S (rovná se kosinu úhlu fázového posunu)

3. Výpočet výkonových veličin za sinusových podmínek

Sinusovými podmínkami rozumíme stav, kdy časové průběhy proudu i napětí v elektrickém obvodu mají čistě sinusový tvar. Tento stav může nastat pouze za předpokladu, že v obvodu se nacházejí pouze lineární prvky s lineárními parametry, což jsou rezistory, induktory a kapacitory. Pokud budeme tento typ lineárního obvodu napájet sinusovým napětím, bude i proud protékající obvodem mít sinusový průběh. Pak můžeme obě veličiny vyjádřit pomocí vztahů:

$$u \equiv u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t), i \equiv i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (1.)$$

kde U a I jsou efektivní hodnoty napětí (V) a proudu (A), ω je úhlový kmitočet ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$), t je čas (s) a φ je fázový posun mezi napětím a proudem (rad). Pro zátěž indukčního charakteru, kdy je proud zpožděn za napětím je $\varphi > 0$ rad.

Na základě vztahu pro výpočet okamžitého výkonu:

$$p \equiv p(t) = u \cdot i \quad (2.)$$

a vztahu (1.) můžeme odvodit vzorec pro okamžitý výkon:

$$p = U \cdot I [\cos(\varphi) - \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)] \quad (3.)$$

Který je tvořen dvěma složkami:

- 1) Časově neproměnnou stejnosměrnou složkou $U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$
- 2) Střídavou složkou s dvojnásobným kmitočtem napájecího napětí $U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)$

První složka představuje střední hodnotu okamžitého činného výkonu za dobu periody, což odpovídá definici činného výkonu, který je též definován jako:

$$P = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} p(t) \cdot dt \quad (\text{W}) \quad (4.)$$

Z fyzikálního hlediska je činný výkon P střední hodnota intenzity toku energie, tj. množství energie přepravené za časovou jednotku, vyjádřenou v joulech za sekundu, tedy ve wattech. Na základě těchto poznatků můžeme činný výkon vyjádřit jako

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{W}) \quad (5.)$$

Zdánlivý výkon S je matematicky vytvořená veličina pro jednofázové obvody jako součin efektivní hodnoty fázového napětí U a fázového proudu I :

$$S = U \cdot I \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (6.)$$

Dodejme, že v případě třífázových obvodů hovoříme o součtu zdánlivých výkonů v jednotlivých fázích. Jedná se o veličinu souhrnně vyjadřující požadavky na napěťové a proudové dimenzování jednotlivých částí elektroenergetického systému, tzn. zdánlivý výkon určuje velikost transformátorů, přenosovou schopnost rozvodných vedení a podobně. (3)

Jalový výkon Q reprezentuje střídavou složku okamžitého výkonu, tj. energii přelévající se mezi zdrojem a zátěží.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{var}) \quad (7.)$$

Nejdůležitější charakteristiky jalového výkonu dle (4) jsou tyto:

- 1 Jalový výkon je roven špičkové hodnotě obousměrně pulzujícího okamžitého výkonu skrz určitý bod výkonového systému.
- 2 Jalový výkon je úměrný rozdílu mezi elektrickou energií uloženou v induktoru a energií uloženou v kapacitoru.
- 3 Když je jalový výkon redukován k nule, účinník bude jednotkový.
- 4 Jalový výkon doplňuje výkonový trojúhelník $Q^2 + P^2 = S^2$.
- 5 Suma všech jalových výkonů v uzlu výkonového systému je rovna nule.
- 6 Jalový výkon může být vyjádřený pomocí veličin U , I a $\sin(\varphi)$.
- 7 Jalový výkon může být kladný nebo záporný (znaménko vyjadřuje, zdali má zátěž induktivní charakter nebo kapacitní charakter).
- 8 Jalový výkon může být redukován k nule pomocí vložení induktivních nebo kapacitních komponent do výkonového systému.
- 9 Úbytek napětí na přenosovém vedení výkonového systému je přibližně úměrný jalovému výkonu.

Na tyto charakteristiky jalového výkonu se budou odvolávat následující kapitoly, které se týkají teorie.

4. Způsoby výpočtu výkonových veličin za periodických podmínek

Tato kapitola pojednává o některých metodách výpočtů výkonů za periodických podmínek dle (4).

4.1 Definice podle C. Budeana

Dle (4) činný výkon za neharmonických, ale periodických podmínek je definován jako:

$$P = \sum_n U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n) \quad (\text{W}) \quad (8.)$$

Kde U_n a I_n jsou efektivní hodnoty napětových a proudových harmonických řádu n , a φ_n je fázový úhel mezi nimi. Na tomto principu je založená i definice jalového výkonu, který je definován jako:

$$Q = \sum_n U_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_n) \quad (\text{var}) \quad (9.)$$

Avšak tato definice není v souladu s rovnicí výkonového trojúhelníku, neboť

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (10.)$$

Zdánlivý výkon je definován jako efektivní hodnota napětí a proudu podle vztahu (6.), a tudíž platí:

$$S^2 = \sum_n U_n^2 \cdot \sum_n I_n^2 \geq \left(\sum_n U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_n U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n \right)^2 \quad (11.)$$

Proto je do definice C. Budeana přidán tzv. deformační výkon D , tedy:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (12.)$$

a z toho plyne vztah:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (13.)$$

Deformační výkon vzniká jako produkt proudových a napětových harmonických složek. Může být redukován k nule, pokud jsou harmonické rovněž redukovány k nule, což vede na sinusové podmínky.

Z důvodů rozeznání jalového výkonu definovaného podle definice C. Budeana a jalových výkonů definovaných podle jiných definic je často zaváděn index B jako Q_B ; deformační výkon je rovněž někdy označován jako D_B .

Hlavní výhodou této definice je, že je v souladu s charakteristikou jalového výkonu č. 5 (suma všech jalových výkonů ve výkonovém uzlu je rovna nule). Hlavní nevýhodou je, že tato definice není v souladu s charakteristikami č. 3 a 8. To znamená, že není jisté, zdali účinník bude roven jedné, pokud jalový výkon (podle této definice) bude úplně kompenzován vložení indukčních nebo kapacitních komponent. Zkonstruovat analogové měřicí přístroje, které měří Q_B , je prakticky nemožné, protože by vyžadovaly filtr, který by všechny harmonické posunul o úhel 90° ve stejném čase a jeho zesílení pro všechny frekvence by bylo rovno jedné.

4.2 Definice podle S. Fryze

Jalový výkon definován dle (4) je založen na analýze v časové oblasti. Proud je rozdělen do dvou částí. První částí je proud i_a o stejném tvaru a fázi jako průběh napětí. Jeho amplituda, která je označena jako I_a , je při vynásobení s hodnotou napětí rovna činnému výkonu. Druhá část proudu je pouze zbytkový proud označovaný i_r . Tyto dva proudy mohou být určeny z rovnic:

$$i_a = \frac{P}{U^2} \cdot u \quad (A) \quad (14.)$$

$$i_r = i - i_a \quad (A) \quad (15.)$$

Důvod pro toto dělení je, že proud i_a je proud čistě odporové zátěže, takže pro stejné napětí bude vyvíjen stejný výkon, jako byl změřen na zátěži. To znamená, že když i_r lze kompenzovat, pak se zdroj bude chovat stejně jako při odporové zátěži a účinník bude roven jedné. To se jednoduše ukáže tím když i_a a i_r jsou kolmé a pak efektivní hodnota může být určena jako:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad (A) \quad (16.)$$

Ve skutečnosti vztah (14.) dává pouze možnou amplitudu proudu i_a , když bude kolmý na zbytkový proud i_r a bude mít stejný tvar jako napětí. Zdánlivý výkon lze potom získat jako produkt efektivního napětí a proudu:

$$S^2 = U^2 \cdot I^2 = U^2 (I_a^2 + I_r^2) = P^2 + Q^2 \quad (V \cdot A) \quad (17.)$$

Definice podle Fryze používá označení P_b namísto Q ve své definici jalového výkonu. V jiné literatuře je jalový výkon v souvislosti s touto definicí označován jako Q_F s názvem „fiktivní výkon“.

Výhodou této definice je, že nezavádí žádnou čtvrtou složku výkonu. Je také v souladu s charakteristikou jalového výkonu č. 3, to znamená, že když jalový výkon je redukován k nule, účinník bude jednotkový. Návrh analogových měřicích přístrojů, které měří jalový výkon podle této definice je relativně jednoduchý. Hlavní nevýhodou je, že definovaný jalový výkon není v souladu s charakteristikou 5. To znamená, že není jisté, zdali suma jalových výkonů v uzlu systému bude

nulová, a Q_F tedy nemůže být obecně použit ve výpočtech toku energie. Dále Q_F neposkytuje informaci o tom jak provést kompenzaci pomocí pasivních komponent. Pro sinusové podmínky je tato definice jalového výkonu samozřejmě rovna standardnímu jalovému výkonu.

Na druhou stranu, zbytkový proud i_r je velmi dobrou vstupní hodnotou pro aktivní kompenzátory a je často používána za účelem charakteristiky č. 8. Avšak pokud proud i_r je kompenzován, úbytek napětí na impedanci zdroje bude změněn. Takže napětí na zátěži také změní svoji velikost a nepatrně i tvar, což znamená, že zátěž není plně kompenzována. Úplná kompenzace vyžaduje zpětnovazební smyčku nebo znalost impedance zdroje. Tato kompenzace sdílí nevýhodu s mnoha jinými koncepty, protože jediný způsob, jak řešit tento problém, je měřit impedanci zátěže a vytvořit vhodnou „zápornou impedanci“.

4.3 Definice podle W. Shepherd a P. Zakikhaniho

Tato definice jalového výkonu (4) je založena na analýze ve frekvenční oblasti. Nelineární zátěž připojená k ideálnímu zdroji bude mít za následek, že proudové harmonické složky nebudou mít žádné odpovídající napěťové harmonické složky. Při správném zacházení s nelineární zátěží, můžeme rozdělit proudové a napěťové harmonické na společné a rozdílné harmonické. Pro společné harmonické řádu n jsou U_n a I_n nenulové, kdežto pro rozdílné harmonické řádu n je pouze U_n nebo I_n nenulová. Potom může být zdánlivý výkon vyjádřen jako:

$$S^2 = \left(\sum_{n \in N} U_n^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \right) \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right) \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (18.)$$

Kde N je skupina všech společných řádů harmonických a M a P obsahují všechny rozdílné nenulové řády harmonických napětí a proudu podle pořadí (to znamená, že M je skupina řádů, pro které napěťové harmonické jsou nenulové, když odpovídající proudové harmonické jsou nulové vlivem nelinearity). Činný výkon je samozřejmě stále definován jako:

$$P = \sum_n U_n \cdot I_n \cdot \cos \phi_n \quad (\text{W}) \quad (19.)$$

Zavedením návrhu rozdělit zdánlivý výkon na:

$$S_R^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \cos^2(\phi_n) \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (20.)$$

$$S_X^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \sin^2(\phi_n) \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (21.)$$

a zbytkový zdánlivý výkon:

$$S_D^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{p \in P} I_p^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right) \quad (V \cdot A) \quad (22.)$$

které určí:

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (V \cdot A) \quad (23.)$$

Protože všechny složky zdánlivého výkonu jsou definovány jako efektivní hodnoty, žádná z nich nemá znaménko. Shepherd považoval svoji definici jako bližší fyzikální realitě, obzvláště pro kompenzaci jalového výkonu z důvodu maximálního účinníku (s pasivními komponenty). Podle Shepherdova je toho dosaženo pouze, když S_X^2 je minimalizováno a pokud S_D^2 obsahuje pouze rozdílné harmonické, které nemohou být kompenzovány s použitím pasivních komponent. To je pouze přibližná pravda, protože hodnoty harmonických proudů I_n budou ovlivněny kompenzací a pak i poslední část vztahu (22.) bude poněkud ovlivněna kompenzací.

Jedna hlavní nevýhoda tohoto návrhu je, že S_R^2 není rovno P^2 , i když obsahuje P^2 . Pokud je napětí (nebo proud) pouze harmonický, pak $S_R = U \cdot I \cdot \cos(\varphi_1) = P$, $S_X = Q_B = U \cdot I \cdot \sin(\varphi_1)$ a $S_D = D$. Pro lineární systém platí, že $S_D^2 = 0$ pokud neobsahuje společné harmonické. Avšak zdrojová impedance v praktických měřeních bude vždycky nenulová a proto skutečně rozdílné harmonické složky nebudou nikdy existovat a S_D bude vždycky nulové pro praktické lineární a nelineární systémy. Takže přestože průběh napětí bude téměř sinusový, značně zdeformovaný průběh proudu bude mít za následek velké ovlivnění S_R a S_X , hlavně jako produkt proudových harmonických a hlavní napěťové harmonické. To znamená, že S_R může být velmi rozdílné od P a stejně tak S_X může být velmi rozdílné od Q_B , přestože napětí bude téměř harmonické. Dále, v praktických měřicích aplikacích bude vždy vstupní šum a vstupní deformace harmonických, takže i když měřicí systém naměří některé napěťové harmonické jako nulové, bude to záležet pouze na limitním rozlišení daného přístroje. A jiný přístroj s vyšším rozlišením naměří nenulové hodnoty. Proto dělení na společné a rozdílné harmonické může být prezentováno jako nástroj pro zpracování teoretických případů a může být nebezpečné implementovat S_D , podle této definice, do měřicích přístrojů.

Tyto veličiny jsou definovány ve frekvenční oblasti a mohou být měřeny pouze pomocí přístrojů s FFT analýzou. Vzhledem k tomu, že tato definice vznikla v roce 1972, to byl zásadní problém.

U této metody je problém, jak rozlišit společné a rozdílné harmonické (tedy řád N , M a P). V praxi totiž nulovou hodnotu jakékoli harmonické složky obvykle nenaměříme. Proto bylo v programu použito dvou nových vstupů: tzv. „Zaokrouhlovač“ I a U . Pomocí těchto dvou vstupních hodnot uživatel určuje, od jaké hodnoty se bude proud a napětí zaokrouhlovat k nule, a tedy i od jaké hodnoty se budou harmonické složky třídit na společné a rozdílné.

Původní myšlenka byla taková, že se bude pomocí zaokrouhlení určovat nejnižší desetinná pozice naměřené hodnoty, která musí být nenulová. Tento návrh byl ale změněn, a to tak, že ovladačí prvky pro zaokrouhlování nebudou určovat desetinnou pozici, ale minimální procentuální hodnotu vztaženou k základní harmonické (50 Hz).

4.4 Definice podle Sharona

Tato definice jalového výkonu (4) je založena na analýze ve frekvenční oblasti. Je zde malé, ale zato důležité vylepšení oproti předchozí definici výkonu. Tato definice začíná stejným dělením harmonických na společné a rozdílné složky.

$$S^2 = \left(\sum_{n \in N} U_n^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \right) \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right) \quad (\mathbf{V} \cdot \mathbf{A}) \quad (24.)$$

Kde N je skupina všech společných řádů harmonických a M a P obsahují všechny rozdílné, nenulové řády harmonických napětí a proudu podle pořadí (to znamená, že M je skupina řádů, pro které napěťové harmonické jsou nenulové, když odpovídající proudové harmonické jsou nulové vlivem nelinearity). Činný výkon je samozřejmě stále definován jako:

$$P = \sum_n U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n) \quad (\mathbf{W}) \quad (25.)$$

Sharon navrhuje rozdělení zdánlivého výkonu na komponenty:

$$S_Q^2 = U_{\text{RMS}}^2 \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \sin^2(\varphi_n) \quad (\mathbf{V} \cdot \mathbf{A}) \quad (26.)$$

A zbytkový výraz:

$$S_C^2 = \sum_{m \in M} U_m^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \cos(\varphi_n) + U_{\text{RMS}}^2 \cdot \sum_{p \in P} I_p^2 + \frac{1}{2} \sum_{\beta \in N} \sum_{\chi \in N} \{ U_\beta I_\chi \cos(\varphi_\chi) - U_\chi I_\beta \cos(\varphi_\beta) \} \quad (\mathbf{V} \cdot \mathbf{A}) \quad (27.)$$

Které vytvoří:

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (\mathbf{V} \cdot \mathbf{A}) \quad (28.)$$

Autor také navrhuje výpočet pro optimální kompenzaci pomocí paralelního kondenzátoru nebo cívky.

$$C_{\text{opt}} = \frac{\frac{1}{\omega} \sum_{n \in N} U_n n I_n \sin \phi_n}{\sum_{n \in N \cup M} n^2 U_n^2} \quad (\mathbf{F}) \quad (29.)$$

$$L_{\text{opt}} = \frac{1}{\omega} \frac{\sum_{n \in N \cup M} \frac{1}{n^2} U_n^2}{\sum_{n \in N} U_n \frac{1}{n} I_n \sin \phi_n} \quad (\text{H}) \quad (30.)$$

Sharon prohlásil, že kompenzace pomocí paralelního kondenzátoru nebo cívky ovlivní pouze S_Q . To bude pravda, pokud impedance zdroje bude zanedbatelná. P není ovlivněno, protože napětí na zátěži se nemění a $I_n \cos \phi_n$ je konstantní, S_C není ovlivněno pokud U_{RMS} , U_p , I_p a $I_n \cos \phi_n$ zůstávají konstantní.

V této definici jsou dva podstatné rozdíly oproti definici podle W. Shepherd a P. Zakikhaniho. První rozdíl je ten, že definice podle Sharona uvádí P jako jednu z výkonových složek a ne jako samostatnou definici. Druhý rozdíl je méně patrný, a je ten, že S_Q je určen z násobení celkovou efektivní hodnotou napětí a ne pouze efektivní hodnotou společných harmonických složek. To může vypadat jako minimální změna, ale odstraňuje to některé nejednoznačnosti způsobené obtížným oddělením rozdílných řádů od společných v měřicích aplikacích. Činný výkon není tímto roztržiděním harmonických samozřejmě ovlivněn. S_Q také není ovlivněno žádným problémem způsobeným tříděním napěťových harmonických, protože do tohoto výpočtu jsou započítány všechny napěťové harmonické složky. Avšak, velké proudové harmonické s velmi malými odpovídajícími napěťovými harmonickými mohou být příčinou poměrně velké nejistoty, kvůli rozhodování o tom zdali se jedná o společné nebo rozdílné harmonické. Přestože tento druh proudů ovlivní měření, neovlivní kompenzaci, protože má zanedbatelný vliv na výpočet C_{opt} a L_{opt} .

4.5 Návrh standardu IEEE 1459

IEEE pracovní skupina pro „Neharmonické podmínky: vliv na měření a definice výkonu“ navrhuje „praktické definice pro výkon“ (4) (5). Hlavní rozdíl mezi touto definicí a ostatními definicemi je ten, že odděluje základní veličiny P_1 a Q_1 od zbývajících komponent zdánlivého výkonu. Důraz je kladen především na kvalitu měření spíše než na kompenzaci. Prvním bodem je oddělení základní napěťové a proudové harmonické od efektivní hodnoty, tedy:

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 = U_1^2 + \left(U_0^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \right) \quad (\text{V}) \quad (31.)$$

a

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \left(I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \right) \quad (\text{A}) \quad (32.)$$

Po vynásobení, je zdánlivý výkon tvořen:

$$S^2 = (U \cdot I)^2 = (U_1 \cdot I_1)^2 + (U_1 \cdot I_H)^2 + (U_H \cdot I_1)^2 + (U_H \cdot I_H)^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (33.)$$

Dále jsou definovány výkony pro základní harmonické U a I :

$$S_1^2 = (U_1 \cdot I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (34.)$$

$$P_1^2 = (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1))^2 \quad (\text{W}) \quad (35.)$$

$$Q_1^2 = (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1))^2 \quad (\text{var}) \quad (36.)$$

kde S_1 , P_1 a Q_1 jsou: základní zdánlivý výkon, základní činný výkon a základní jalový výkon. Tento standart dále definuje veličiny S_H (harmonický zdánlivý výkon), P_H (harmonický činný výkon) a D_H (harmonický deformační výkon). Ty jsou definovány jako:

$$S_H = U_H \cdot I_H \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (37.)$$

$$P_H = U_0 \cdot I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) \quad (\text{W}) \quad (38.)$$

$$D_H^2 = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (\text{var}) \quad (39.)$$

Tři zbývající složky vztahu (33.), tvoří vedlejší zdánlivý výkon, který je definován jako:

$$S_N^2 = (U_1 \cdot I_H)^2 + (U_H \cdot I_1)^2 + (U_H \cdot I_H)^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (40.)$$

Také neaktivní výkon, který je definován jako:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{var}) \quad (41.)$$

je odchylkou od výše uvedené metody dělení. Dále harmonický zdánlivý výkon je definován, a dále rozdělen následovně:

$$S_H^2 = (U_H \cdot I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A}) \quad (42.)$$

Kde P_H je celkový harmonický výkon a N_H celkový harmonický neaktivní výkon.

Tento standart IEEE zavádí novou veličinu v souvislosti s periodickými podmínkami signálu: celkové harmonické zkreslení (THD – Total harmonic distortion). Pro napětí a proud jsou tyto veličiny definovány podle následujících rovnic:

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (-) \quad (43.)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (-) \quad (44.)$$

Tyto veličiny udávají, do jaké míry je signál zdeformován obsahem harmonických složek.

Směr toku může být přidělen P_1 a Q_1 , ale nemusí být přidělen žádné ze tří částí vedlejšího zdánlivého výkonu definovaného vztahem (40.). Je zde dále ukázáno, že normalizovaný harmonický zdánlivý výkon S_H/S_1 je přibližně roven $THD_U \cdot THD_I$ a že normalizovaný vedlejší harmonický zdánlivý výkon S_N/S_1 je přibližně roven THD_I . Za zmínku také stojí to, že tato definice je dále rozšířena pro pokrytí nevyvážených trojfázových soustav.

5. Vývoj softwaru

Tato kapitola se bude zabývat stručným popisem pojmu virtuální instrumentace. Dále se bude zabývat popisem programového prostředí LabVIEW a vývojem měřicí aplikace. Informace byly čerpány ze zdroje (6).

5.1 Úvod do virtuální instrumentace

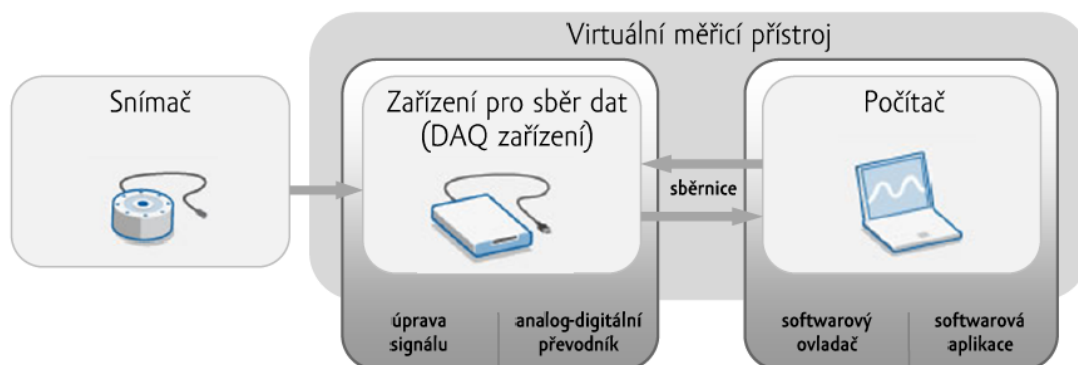
V dnešní době se s pojmem „virtuální“ setkáváme na každém kroku, ať už se jedná o zábavu, řídicí aplikace nebo o simulátory fyzikálních úloh. Tento nový trend zavádění virtuálního prostředí do reálného světa se rovněž značně projevuje i v oblasti měřicí techniky. Funkčnost starších měřicích přístrojů byla striktně dána jejich výrobcem. Tyto přístroje obsahovaly pevný počet měřicích kanálů, mechanické prvky (tlačítka, přepínače, potenciometry) a indikační prvky (LED diody, indikátory) jejichž funkčnost byla dána hardwarovým zapojením.

V pozdější době se začaly objevovat měřicí přístroje, které umožňovaly propojení s PC a vzájemnou komunikaci mezi nimi. Díky tomuto způsobu předávání dat byl významně snížen lidský chybový faktor (např. chyba obsluhy při opisování údajů z přístrojů a následný jejich přepis do PC).

Další výhodou propojení měřicího přístroje s PC byla možnost ovládat některé funkce měřicího přístroje z PC a programově tak částečně měnit jeho funkci. Stále však byla hlavní část funkčnosti měřicího zařízení daná výrobcem a uživatel mohl dělat jen parametrizaci předem daných funkcností přístroje. Nicméně tyto přístroje již umožňovaly větší spektrum jejich nasazení a tím svému uživateli zajišťovali větší flexibilitu.

S rostoucími nároky na flexibilitu měřicích přístrojů a rozvojem výpočetní techniky došlo k vytvoření nového trendu virtuální instrumentace. Princip virtuální instrumentace je založen na tom, že si uživatel dle potřeby pořídí měřicí kartu s libovolným počtem vstupů a výstupů (digitální i analogové). Měřicí karta bývá často nazývána jako DAQ – Data Acquisition neboli zařízení pro sběr dat. Tato měřicí karta se pomocí vhodného rozhraní (např. USB) propojí s PC. Měřicí karta následně převádí měřené signály na digitální hodnoty a posílá je pomocí rozhraní do PC. Měřicí karta tedy umožňuje styk PC s reálným světem. Na PC dále běží program, který naměřená data zpracovává přesně podle naprogramovaných algoritmů (zapisuje data do tabulek, ukládá je do souboru, vykresluje grafy, počítá průměry, hlídá alarmové stavy a podobně). Výhodou virtuální instrumentace je velká flexibilita, možnost vytvoření měřicí aplikace přesně na míru, bezproblémové provádění změn algoritmu. Nevýhodou je vývoj měřicího softwaru, který zabere určitou dobu. Software se dá vytvářet jak v textových jazycích (např. C), tak v grafických jazycích (např. LabVIEW).

Dá se tedy říci, že virtuální měřicí přístroj má tři základní fáze. První fází je sběr dat, který probíhá prostřednictvím měřicí karty. Druhou částí je analýza dat a výpočty které provádí PC. Třetí částí je prezentace dat, kdy jsou vyhodnocená data zobrazeny požadovaným způsobem (tabulky, grafy).



Obr. 5.1: Komponenty virtuálního měřicího přístroje, přejato ze (6).

5.2 Vývojové prostředí LabVIEW

LabVIEW je jedním z prostředků, pomocí kterého lze vytvořit software, který bude ovládat virtuální měřicí přístroj. LabVIEW je komerčním produktem firmy National Instruments (NI).

Důvodem proč toto programové prostředí vzniklo, bylo to, že osobou která ví co měřit, jak to analyzovat a jak prezentovat výsledky, je technik. Tento technik ale obvykle nemusí být profesionálním programátorem. Svůj návrh tedy musel předat programátorovi obvykle ve formě blokového schématu a vývojového diagramu. Práci programátora bylo převést funkční schéma do zvoleného programovacího jazyka (v textové podobě), což byla zdlouhavá práce navíc, která do procesu měření nepřinášela žádné inovace.

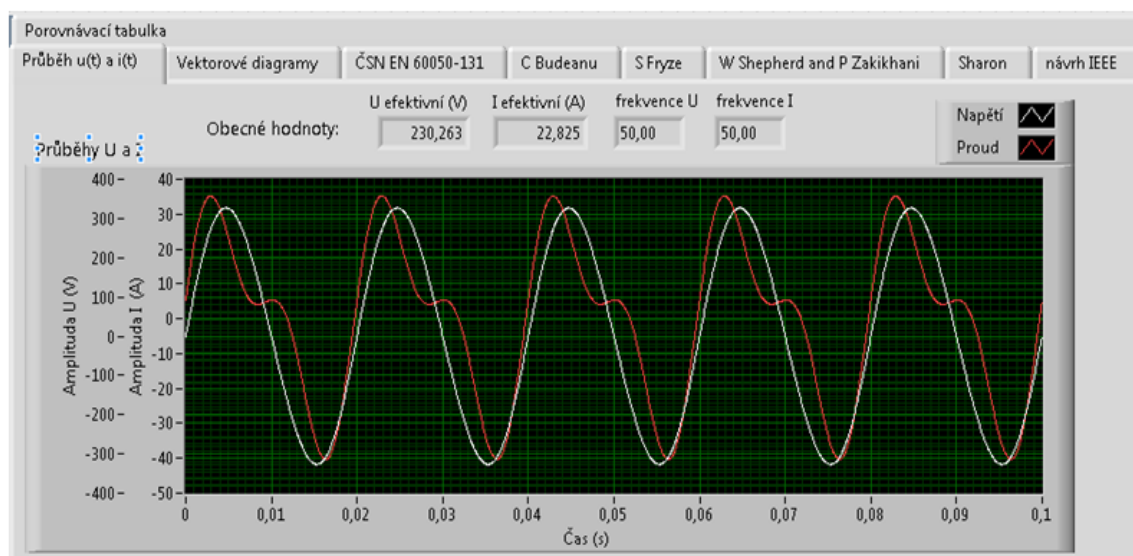
Cílem vývojářů LabVIEW tedy bylo to, aby blokové schéma bylo koncovým tvarem aplikace a nebylo ho třeba převádět do textové podoby. LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je tedy grafické vývojové prostředí, které využívá ikon pro tvorbu programu namísto textu. Tyto ikony se spojují linkami pro předávání dat. LabVIEW je obecným vývojovým prostředím s širokým spektrem knihoven pro vytváření aplikací z oblasti měření. Jedná se o plnohodnotný programovací jazyk se všemi odpovídajícími datovými a programovými strukturami v grafické podobě.

Výsledný produkt tohoto vývojového prostředí se nazývá virtuální instrument (zkráceně VI), protože svým charakterem a činností připomíná skutečný přístroj ve fyzické podobě. Každé VI je tvořeno níže uvedenými částmi:

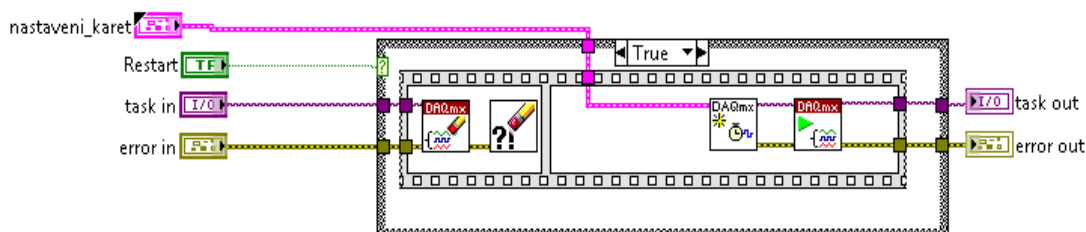
- 1) **Čelním panelem**, který simuluje čelní panel fyzického přístroje. Obsahuje prvky pro zadávání dat a čtení (spínače, otočné knoflíky, indikátory grafy atd.), viz obr. 5.2a.
- 2) **Blokovým diagramem**, ve kterém se vytváří funkční část VI. Vytváří se pomocí ikon, které reprezentují jednotlivé funkce. Tyto ikony se spojují pomocí linek do blokového schématu, které slouží zároveň jako kód aplikace. Kromě ikon obsahuje blokový diagram dále terminály, které zde reprezentují prvky čelního panelu a slouží pro komunikaci s nimi. Viz obr. 5.2b.
- 3) **Ikonou s konektorovým polem**. LabVIEW umožňuje vytvářet modulární hierarchickou strukturu. Základním kamenem tohoto jazyka jsou ikony, což jsou jednotlivé VI. VI fungují v LabVIEW obdobně jako funkce v jazyce C. Každé vytvořené VI může běžet samostatně nebo být implementováno v kódu jiného VI (pak se jedná o tzv. subVI). Pro to aby šlo použít

VI jako subVI v jiném kódu slouží ikona z konektorovým polem, které reprezentují toto subVI v blokovém diagramu jiného VI. Viz obr. 5.2c.

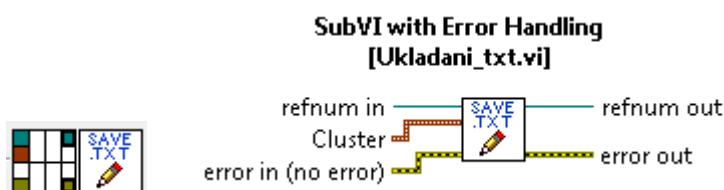
Těmito charakteristickými rysy naplňuje vývojové prostředí LabVIEW podmínky modulárního programování. Svou aplikaci dělí uživatel na jednotlivé úlohy, pro které vytváří dílčí virtuální přístroje (subVI). Z nich následně buduje celou aplikaci jejich spojováním do výsledného virtuálního přístroje.



Obr. 5.2a: Ukázka příkladu čelního panelu.



Obr. 5.2b: Ukázka příkladu blokového diagramu.



Obr. 5.2c: Ukázka příkladu ikony a konektoru pro použití VI jako sub VI v jiném kódu.

5.3 Základní návrh analyzátoru pro měření výkonu

Součástí této bakalářské práce je návrh analyzátoru pro měření výkonu u periodických průběhů napětí a proudu. Protože existuje více druhů matematických definic, které navrhují jak vypočítat

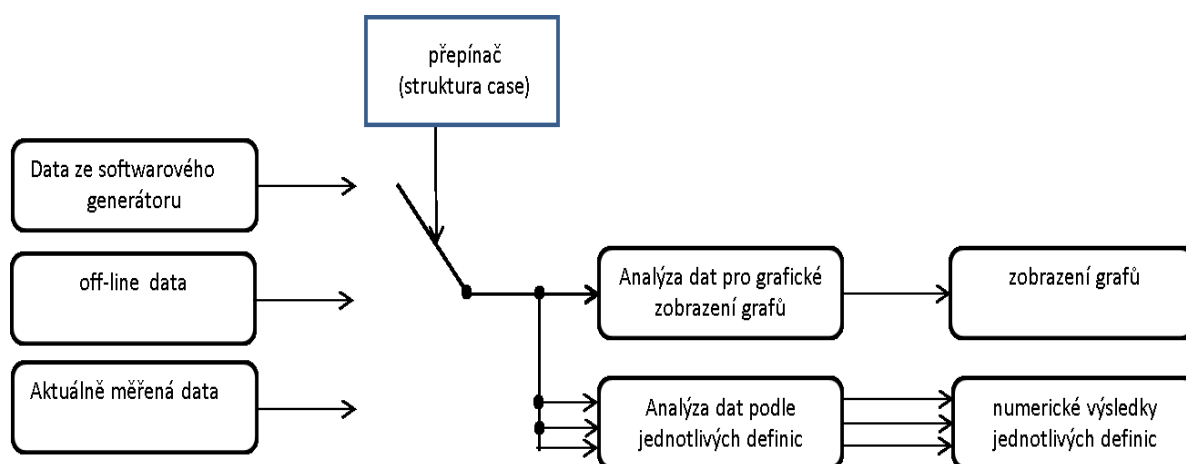
výkonové veličiny za periodických podmínek, bude i tento přístroj vypočítávat výkonové veličiny na základě dále uvedených definic: ČSN EN 60050-131, C. Budean, S. Fryze, W. Shepherd and P. Zakikhani, Sharon, návrh IEEE 1459 a umožní porovnání výsledků.

Analyzátor byl navržen tak, aby mohl pracovat ve třech režimech. První režim umožňuje simulovat libovolný signál napětí a proudu. Analyzátor pak s těmito signály pracuje stejně jako by byly naměřeny na kartě. Tyto signály se tvoří skládáním požadovaného počtu harmonických složek. Tyto harmonické složky se sečtou a vznikne z nich požadovaný signál. Pro každou harmonickou složku se zadává její frekvence, efektivní hodnota a počáteční fáze.

Druhý režim pracuje se skutečnými hodnotami, které ale byly naměřeny a uloženy v minulosti a program je používá v režimu off-line. První i druhý režim tedy dokáže pracovat bez připojené měřicí karty (tzv. v režimu off-line).

Třetí režim již pracuje s měřicí kartou a umožňuje tak měřit okamžité signály proudu a napětí a z nich počítat výkonové veličiny. Program je navržen tak, aby v případě problému s měřicí kartou, nezahavovala celá aplikace, ale bylo umožněno pracovat v režimech off-line, tedy se softwarovým generátorem a s předem naměřenými signály. V případě, že při čtení z karty nastane nějaký problém, je tento problém zobrazen na čelním panelu pomocí statusu měření a popisu chyby.

Blokové schéma na obrázku 5.3a zobrazuje základní strukturu a funkčnost programu.

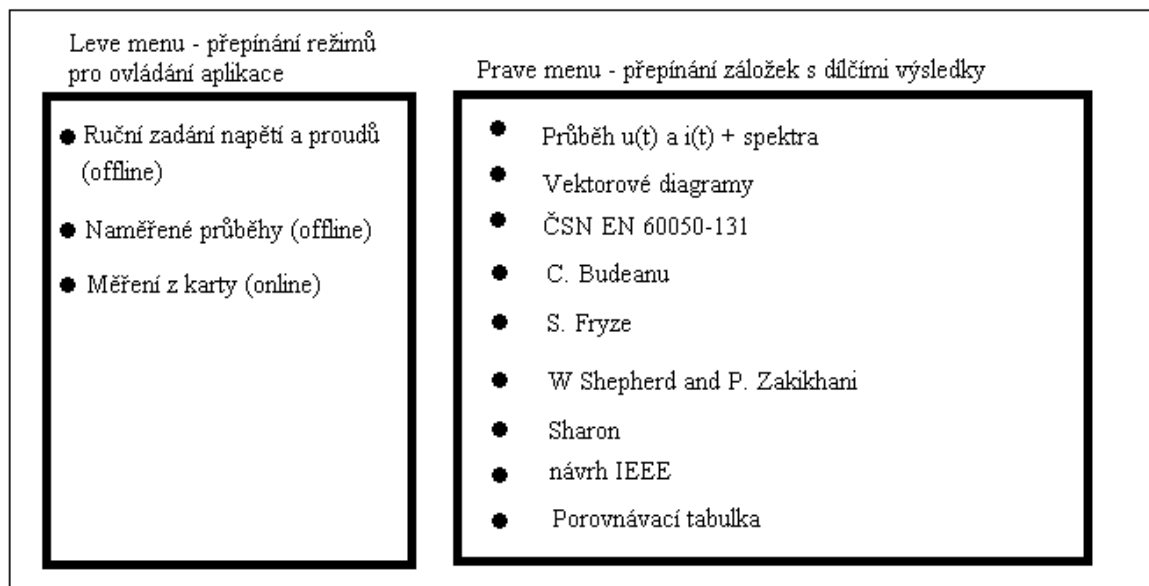


Obr. 5.3a: Blokové schéma funkce programu.

Návrh čelního panelu je potřeba provést tak, aby byl pro koncového uživatele přehledný a logicky uspořádaný. Protože tento analyzátor vyžaduje velké množství prvků jak pro zadávání hodnot tak pro jejich zobrazování, bylo potřeba pečlivě zvolit rozmístění prvků čelního panelu tak, aby se nestal nepřehledným. Základní rozdělení je takové, že v levé části okna je listovací okno (Tab Control), které nabízí záložky pro jednotlivé režimy práce s programem. Toto uspořádání je velice výhodné, protože uživatel nepotřebuje mít na obrazovce zobrazeny prvky, které v daném režimu nefungují.

Stejný systém je použit i pro zobrazované hodnoty. V pravé části čelního panelu je rovněž použito listovací okno, ve kterém jsou logicky rozřizeny vypočtené a naměřené výsledky. Tuto koncepci organizace čelního panelu zobrazuje obr. 5.3b

Čelní panel



Obr. 5.3b: Návrh rozložení prvků čelního panelu.

5.4 Zobrazování vektorových diagramů

Nedílnou součástí pokročilejších analyzátorů výkonů jsou vektorové diagramy, které zobrazují fázory proudů a napětí a také poměry výkonových veličin. V popisovaném virtuálním přístroji jsou zabudovány tři vektorové diagramy.

První vektorový diagram zobrazuje proudové a napěťové fázory buď základní harmonické nebo zvolené harmonické. K přepínání řádu harmonické slouží ovládací prvek. Tento vektorový diagram byl vytvořen tak, aby odpovídal požadavkům normy ČSN EN 60375 části: 10.5 Pravidla pro grafické znázornění fázorů (7):

Fázor $\hat{A} = |\hat{A}| \cdot e^{j\nu}$ je v komplexní rovině znázorněn ve formě šipky. Kladný směr otáčení je proti směru hodinových ručiček. Fázor s argumentem 0 rad směřuje podél kladné reálné osy. Fázor s argumentem $\pi/2$ rad směřuje podél kladné imaginární osy.

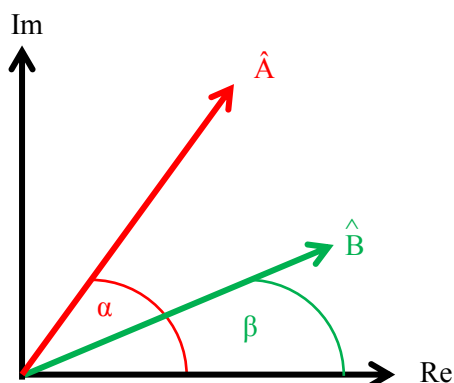
Kapitola 10.6 Pravidla týkající se fázových posunů:

Pro dva fázory:

$$\begin{aligned} a(t) &= \hat{A} \cdot \cos(\omega t + \nu_A) \\ b(t) &= \hat{B} \cdot \cos(\omega t + \nu_B) \end{aligned} \quad (45.)$$

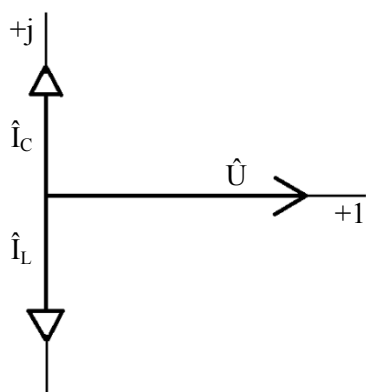
Je fázový posun je vyjádřen jako:

$$\varphi_{AB} = \nu_A - \nu_B \quad (46.)$$



Obr. 5.4a: Fázorový diagram, kladný úhel otáčení je proti hodinovým ručičkám, převzatý z normy ČSN EN 60375 (7).

Zdroj (8) uvádí: „Pro induktivní charakter je Q kladné“, z toho tedy plyne že φ musí být taky kladné. Pro kapacitní charakter musí být φ záporné. Obrázek je vytvořený na základě vzoru z těchto skript a upravený:

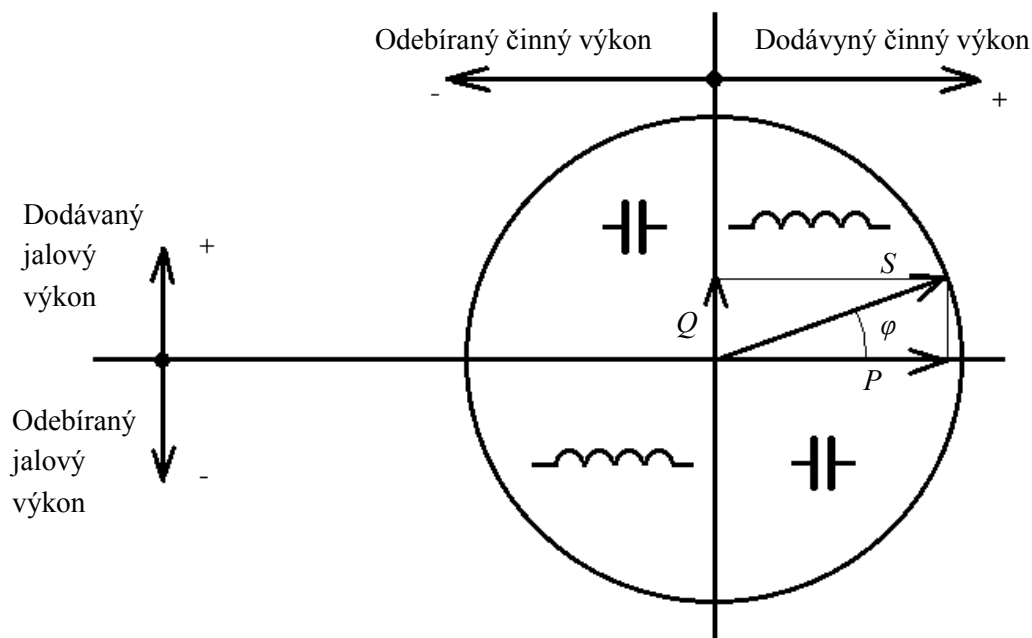


Obr. 5.4b: Vzor vektorového diagramu (8).

Z výše uvedených poznatků lze tedy stanovit vzhled vektorového diagramu, který je zároveň shodný s mezinárodními standardy. Vzhled hotového vektorového diagramu v čelním panelu aplikace principiálně odpovídá obrázku č. 5.4b, kdy je vektor zobrazující napětí vždy ve směru kladné reálné osy a proudový vektor se natáčí kolem něj na základě úhlu φ mezi nimi.

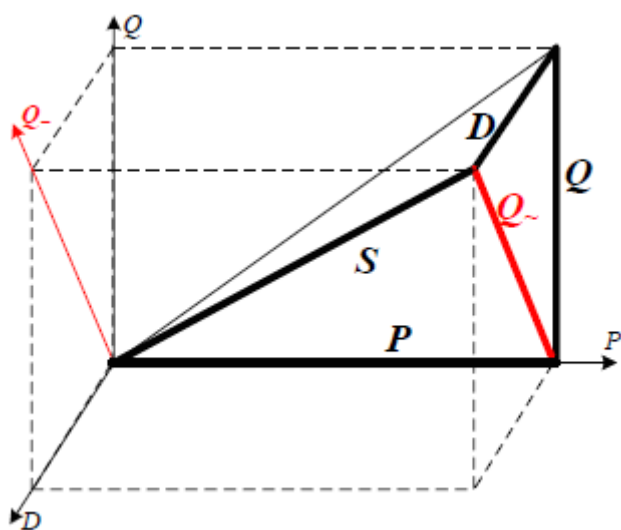
Druhý vektorový diagram zobrazuje poměry mezi zdánlivým výkonem S , neaktivním výkonem Q a činným výkonem P . Tyto tři veličiny tvoří společně pravoúhlý trojúhelník podobně jako v případě veličin zdánlivého výkonu S , jalového výkonu Q a činného výkonu P . Je zde ale podstatný rozdíl v tom, že v případě trojúhelníku s jalovým výkonem odpovídá úhel mezi P a Q úhlu mezi U a I a zároveň účinníku. Tento trojúhelník je však platný pouze pro sinusové podmínky, na které se ovšem v praxi nemůžeme spoléhat. Naproti tomu v trojúhelníku s neaktivním výkonem nemá úhel mezi neaktivním výkonem a činným výkonem žádný fyzikální význam. Nicméně tento výkonový trojúhelník je platný pro periodické podmínky a to je pro praxi mnohem užitečnější.

Tento vektorový diagram výkonů byl sestaven tak, aby odpovídal doporučení normy ČSN EN 62053-23 (9) s tím rozdílem, že místo jalového výkonu je použit neaktivní výkon. Viz obr. č. 5.4c.



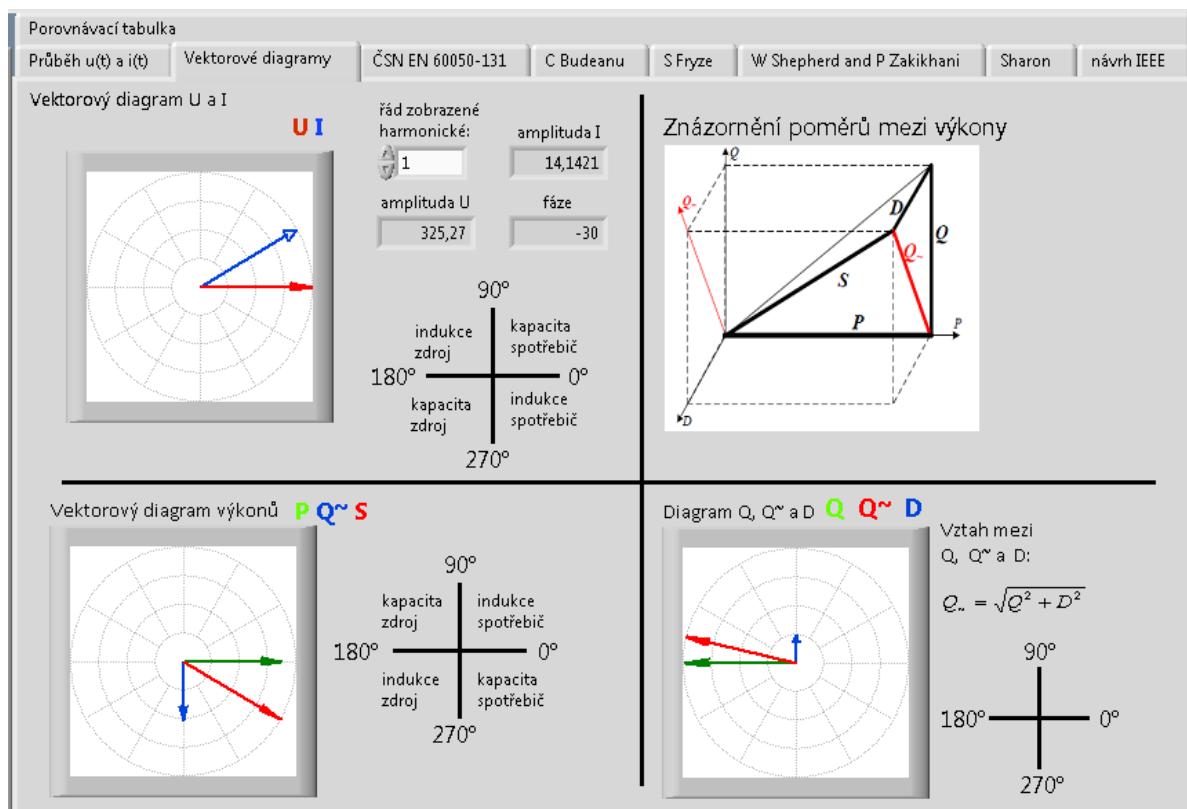
Obr. 5.4c: Geometrické zobrazení poměrů výkonových veličin podle návrhu normy ČSN EN 62053 23 (9).

Třetí vektorový diagram slouží pro znázornění poměrů mezi neaktivním výkonem Q_{\sim} , jalovým výkonem Q a deformačním výkonem D , které jsou vypočteny podle definice C. Budeana. Jedná se o poměrové znázornění, a proto úhly mezi těmito veličinami nemají žádný fyzikální význam. Tento diagram byl sestaven po vzoru obrázku č. 5.4d přejatého ze zdroje (1).



Obr.5.4d: Znázornění poměrů mezi výkonovými veličinami, přejato ze zdroje (1).

Všechny tyto diagramy byly z důvodu porovnatelnosti umístěny do jedné sekce čelního panelu pod názvem „Vektorové diagramy“. Jejich vzhled ukazuje obrázek č. 5.4e. První vektorový diagram umožňuje přepnutí na libovolnou harmonickou složku. Jsou zde i uvedeny amplitudy napěťového a proudového vektoru aby uživatel snadno poznal, kdy se jedná o skutečné a harmonické složky a kdy jen o šum.



Obr. 5.4e: Vektorové diagramy na čelním panelu, umístěné do samostatné záložky

5.5 Vykreslení průběhů proudu a napětí, zobrazení spekter

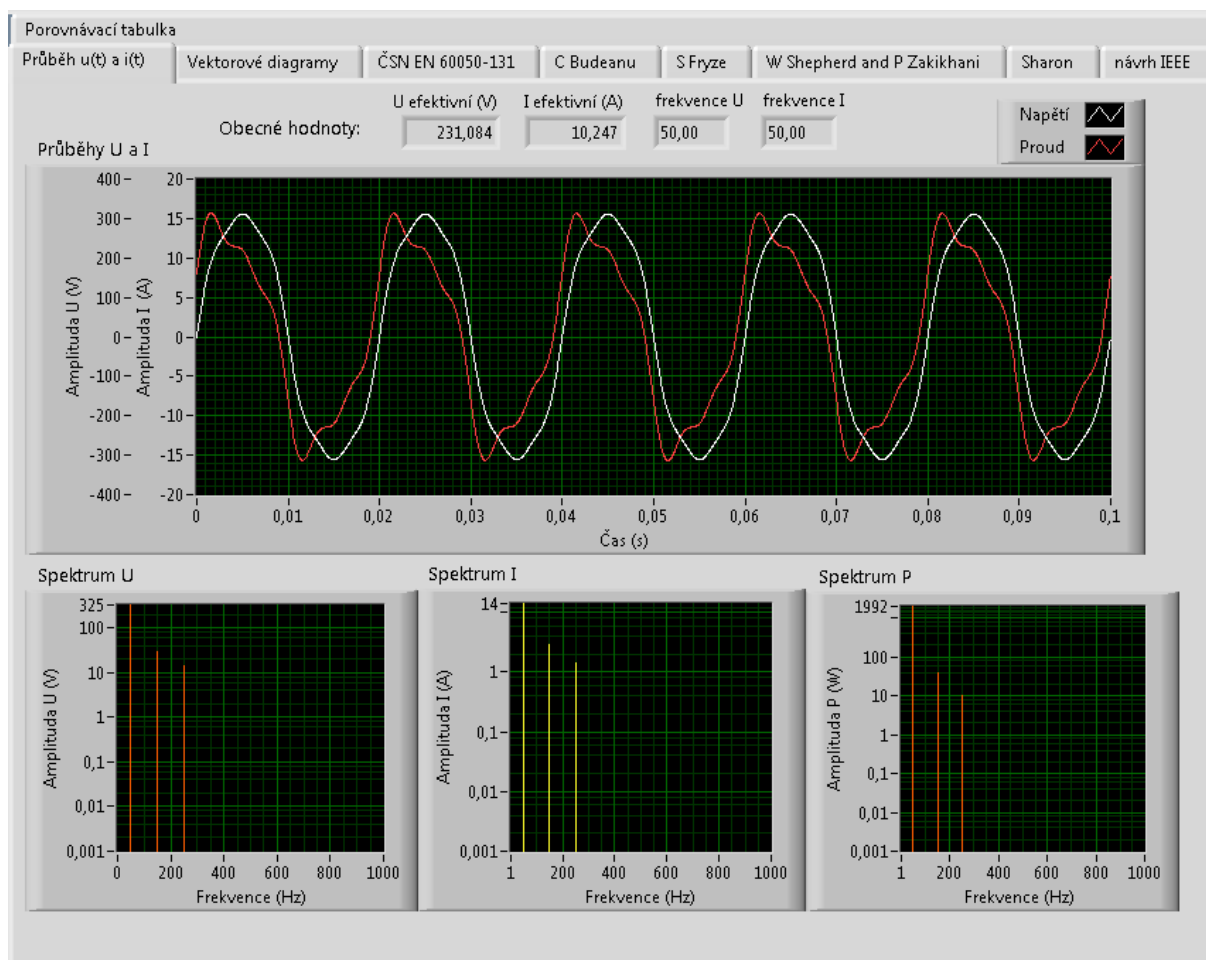
Aby si uživatel mohl udělat dobrou představu o měřených (případně generovaných) průbězích proudu a napětí, obsahuje tato aplikace graf, který zobrazuje okamžité hodnoty analyzovaného signálu podobně jako osciloskop. Jedná se o analyzátor, který pracuje s výkony v napájecí síti. Proto je možné využít předpoklad, že základní harmonická proudu i napětí bude mít frekvenci 50 Hz. Rovněž je stanovena i frekvence vzorkování na hodnotu 50 kHz a počet vzorků se zpracovává vždy po 5000 vzorcích. Z toho vyplývá, že časové okno T_w (Time window) má délku 100ms. Protože perioda signálu je 20 ms, uživatel má v grafu zobrazeno pět period což je optimální pro přehlednost. Protože frekvence signálu v síti téměř nekolísá, nevyžaduje aplikace trigování měřeného signálu a při tom nedochází k nežádoucímu popojíždění měřeného signálu v grafu.

Ve stejné záložce s grafem průběhů jsou rovněž zobrazeny spektra napětí proudu a výkonu. Spektra zobrazují fyzikální veličiny v závislosti na frekvenci a vycházejí z předpokladu, že každý periodický signál lze rozložit na řadu harmonických signálů, jejichž součet tvoří daný periodický

signál. K převodu signálu mezi časovou a frekvenční doménou slouží Fourierova transformace. Pro tuto transformaci v LabVIEW již existují předem nadefinované funkce, které provádějí DFT transformaci (Diskrétní Fourierova transformace). Protože frekvence vzorkování je 50 kHz, lze podle Shannon-Kotělnikova teorému správně navzorkovat harmonickou s frekvencí do 25 kHz. Z důvodu přehlednosti a praktičnosti jsou však spektra dimenzována jen do frekvence 1 kHz, což odpovídá řádu dvacáté harmonické.

Každá složka výkonového spektra se spočte vynásobením příslušné proudové a napěťové frekvenční složky s kosinusem fázového rozdílu mezi nimi. Tím je získáno výkonové spektrum signálu. Sečtením všech spektrálních čar výkonového spektra lze získat hodnotu činného výkonu.

Všechna spektra v této aplikaci jsou jednostranná a v případě proudového a napěťového spektra se zobrazují maximální hodnoty (nikoli efektivní). Zobrazení spekter na čelním panelu ukazuje obrázek č. 5.5.



Obr. 5.5: Záložka čelního panelu zobrazující grafy s průběhy U, I a spektra.

5.6 Měření reálného signálu

Tato měřicí aplikace je rovněž vybavena funkcí, díky níž je schopna měřit pomocí měřicí karty hodnoty proudu a napětí v reálném čase a ihned zobrazovat naměřené a vypočtené výsledky.

V prostředí LabVIEW jsou k dispozici funkce s palety DAQ (Data Acquisition – sběr dat), které slouží k snadnému vytvoření úlohy měření.

Tato část aplikace je postavená tak, aby měření probíhalo kontinuálně. To znamená, že na počátku proběhne jedna inicializace úlohy měření a pak už se stále načítají vzorky z karty. Přitom se určí množství vzorků, které má karta po naměření předat ke zpracování. V této úloze je to paket s pěti tisíci vzorky (zvláště pro proud a napětí, datový typ waveform). Z toho vyplývá, že mezi jednotlivými pakety nejsou časové úseky, během nichž by se neměřilo. Tento přístup má výhodu v tom, že během měření nepřijdeme o žádné informace. Na druhou stranu má ale nevýhodu v tom, že se musí data neustále odebírat dostatečně rychle. Pokud by výpočetní algoritmy byly časově delší než časové okno vzniklé měřením, naměřené vzorky by se hromadily ve vyrovnávací paměti tak dlouho, až by vyvolaly chybu spojenou s přetečením vyrovnávací paměti. Protože však algoritmy v této aplikaci nejsou natolik náročné, je možné tento způsob měření použít.

V případě že v praxi měříme s měřicími kartami, je zapotřebí pamatovat na jeden nežádoucí fakt. Po připojení měřicí karty k počítači s nainstalovaným vhodným softwarem dojde k automatickému nainstalování této karty a k jejímu pojmenování. Toto pojmenování je důležité, protože se musí použít v kódu aplikace při vytváření úlohy měření. Navíc k měření proudu můžeme v praxi použít buď kartu, která má přímo proudové vstupy anebo kartu s napětíovými vstupy na které jsou připojeny proudové kleště. Pro měření s proudovou kartou se musí použít v kódu jiná funkce než při měření s napětíovou kartou. Dále může nastat problém při volení vhodného měřicího rozsahu, protože různé karty mají různé maximální měřicí rozsahy.

Z těchto důvodů byla aplikace vybavena možností predefinování úlohy měření během chodu aplikace. Na čelním panelu v sekci měření z karty má uživatel možnost změnit adresu kanálů, změnit měřicí rozsahy karet, změnit typy zapojení, změnit typ karty pro měření proudu (napětíová nebo proudová) a změnit konstantu převodu měření (vhodná při měření přes transformátory s dělicím poměrem). Po těchto změnách stačí jen stisknout tlačítko pro novou inicializaci měřicí úlohy. Tuto část měřicího panelu ukazuje obrázek č. 5.6. Na této části čelního panelu je rovněž indikátor měření, který zobrazuje, zdali měření probíhá v pořádku, nebo zdali došlo k nějaké chybě. Dále je zde okno s nadpisem „Typ chyby“, které zobrazí bližší informace o případné chybě.

Zadání napětí a proudu
Naměřené průběhy
Měření z karty

Probíhá měření

Adresa kanálu napětí Dev1/ai0 U max 10 U min -10 převodní konstanta U 1 zapojení U RSE	Adresa kanálu proudu Dev1/ai1 I max 10 I min -10 převodní konstanta I 1 zapojení I RSE	Typ karty pro měření proudu Napěťová karta
--	--	---

Popis chyby
Reinicializace měřících kanálů

No Error

Obr. 5.6: Část čelního panelu pro ovládání měření z karty.

6. Testování virtuálního měřicího přístroje

Tato kapitola má čtyři části. První dvě části se věnují offline analýze, kdy měření neprobíhá z karty. Jsou to režimy se softwarovým generátorem a již předem naměřené průběhy. Třetí část se věnuje stručnému popisu měřicího etalonu Omicron CMC 256+, který byl použit pro testování v online režimu. Čtvrtá část se věnuje režimu online, kdy probíhá měření z karty.

6.1 Výsledky testování offline analýzy - generátor

Jak již bylo zmíněno výše, tento virtuální měřicí přístroj dokáže pracovat ve dvou základních režimech. Prvním možností je režim s měřicí kartou, kdy přístroj zpracovává okamžité vzorky (online). Druhá možnost je práce bez měřicí karty, kdy můžeme naměřené hodnoty buď simulovat pomocí generátoru nebo využít v paměti uložené průběhy naměřené jinou aplikací. Tato část se bude zabývat offline analýzou.

Test č. 1: Pomocí generátoru harmonických se nastaví sinusový signál napětí a proudu. $U = 230 \text{ V}$, $I = 10 \text{ A}$, $\varphi = 30^\circ$ (induktivní charakter), $f = 50 \text{ Hz}$. Část čelního Panelu se zadanými hodnotami ukazuje obrázek č. 6.1a. Průběhy a spektra jsou vidět na obrázku č. 6.1b, vektory na obrázku č. 6.1c. Výsledky aplikace ukazuje obrázek č. 6.1d.

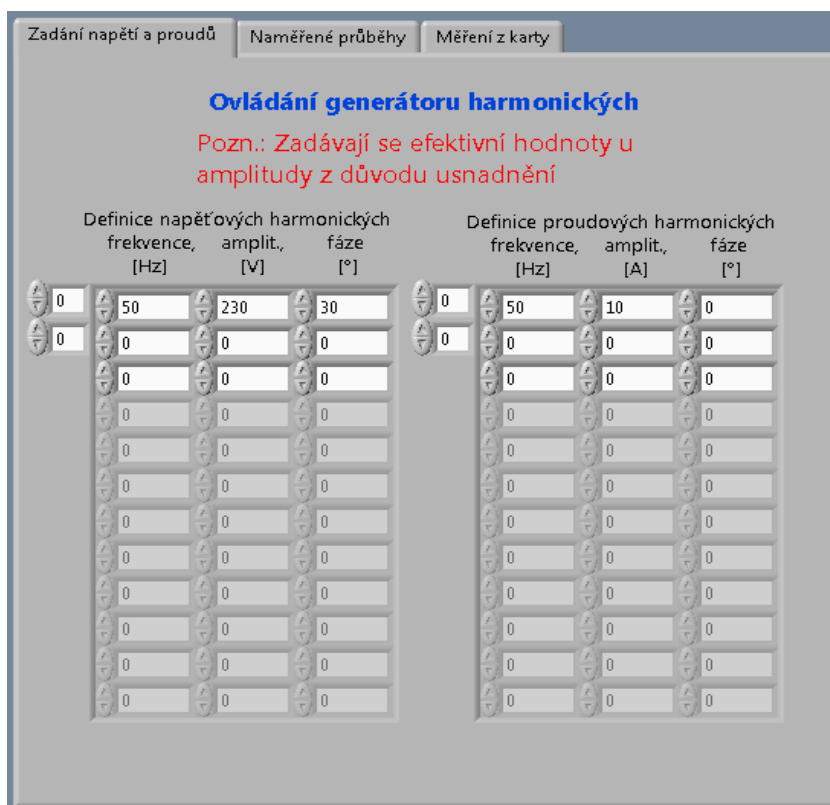
Na základě těchto údajů můžeme některé veličiny vypočítat:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 230 \cdot 10 \cdot 0,866 = 1991,86 \text{ W} \quad (47.)$$

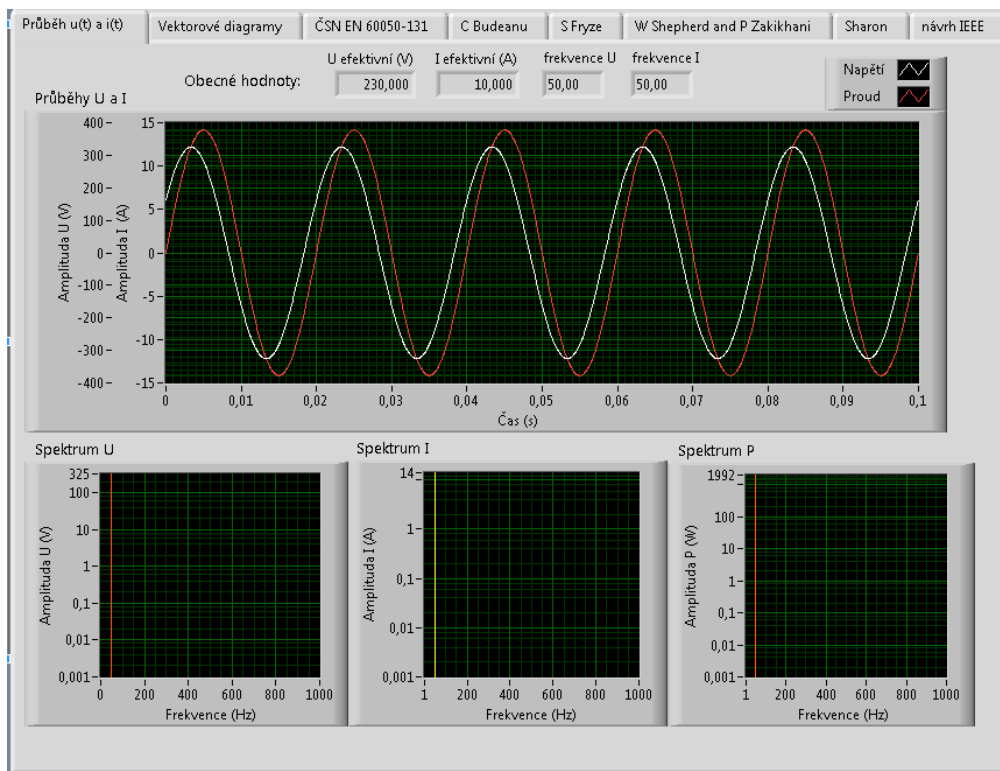
$$S = U \cdot I = 230 \cdot 10 = 2300 \text{ V} \cdot \text{A} \quad (48.)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 230 \cdot 10 \cdot 0,5 = 1150 \text{ var} \quad (49.)$$

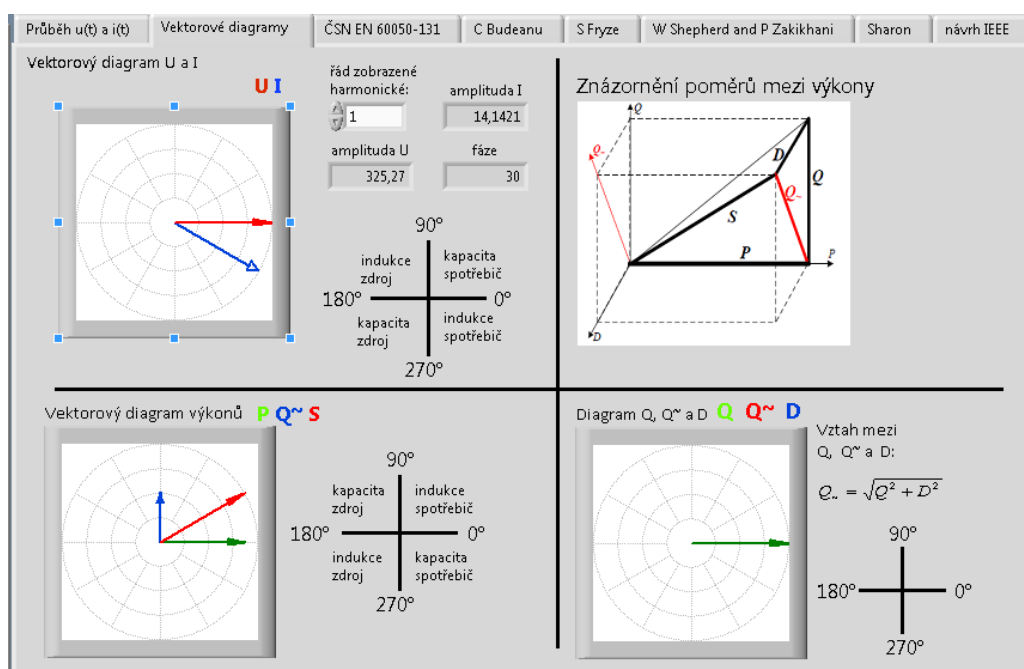
$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1991,86}{2300} = 0,866 \quad (50.)$$



Obr. 6.1a: Zadání hodnot U a I do simulátoru.



Obr. 6.1b: Průběhy a spektra čelního panelu.



Obr. 6.1c: Vektorové diagramy.

Činný výkon:	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} u_i \cdot i_i \text{ (W)}$	1991,858
Zdánlivý výkon:	$S = U \cdot I \text{ (V} \cdot \text{A)}$	2300
Jalový výkon (sinusové podmínky):	$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (var)}$	1150
Neaktivní výkon:	$Q_{\sim} = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ (var)}$	1150
Účinník:	$\lambda = \frac{P}{S} \text{ (-)}$	0,866
kosinus fí: (účinník v případě jedné harmonické)	$\cos \varphi = \cos(\varphi_U - \varphi_I) (^{\circ})$	0,866

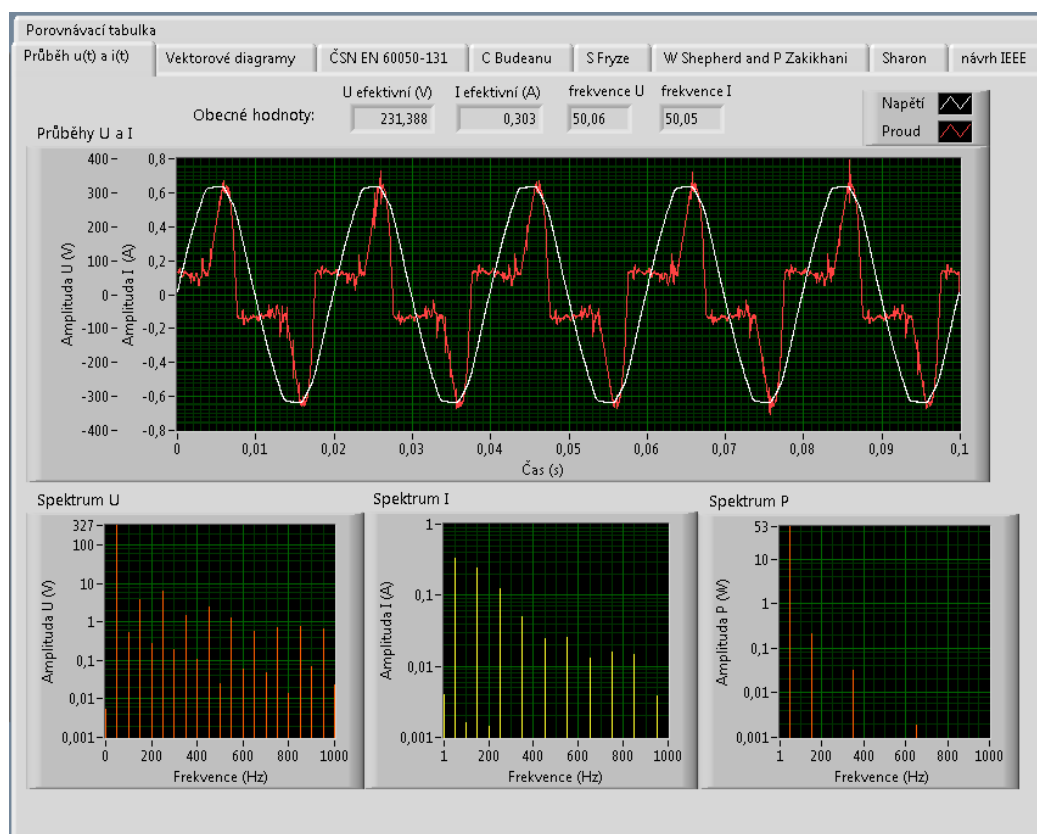
Obr. 6.1d: Výsledky podle výpočtů dle normy ČSN EN 60050-131.

Na těchto obrázcích je vidět, že výsledky vypočítané podle vztahů (47. – 50.) odpovídají výsledkům vypočteným aplikací (obr. č. 6.1d). Na obrázku č. 6.1b je vidět, že proud byl zpožděn za

napětím, což odpovídá chování induktivní zátěže. Na Obrázku 6.1c na diagramu proudu a napětí je vidět, že vektor proudu je posunut o 30° oproti vektoru napětí a spadá do kvadrantu s induktivní zátěží. Na druhém vektorovém diagramu s veličinami S , P a Q je vidět vznik jalového výkonu a to, že zdánlivý výkon se nachází v oblasti s induktivní zátěží. Na třetím vektorovém diagramu s veličinami Q , Q , a D je vidět pouze vektor výkonu Q , který se překrývá s vektorem výkonu Q . Vektor zobrazující výkon D je nulový, protože analyzovaný signál neobsahuje vyšší harmonické složky. To že vektory Q a Q mají stejnou velikost je vidět z výsledků těchto veličin na obrázku č. 6.1d. Všechny tyto údaje potvrzují správnou funkci aplikace v režimu s generátorem.

6.2 Výsledky testování off-line dat – naměřené průběhy

Další režim, ve kterém může aplikace pracovat, je možnost analyzovat průběhy uložené v paměti z jiného měření. Jedná se o průběhy proudu a napětí, které byly naměřeny na různých reálných spotřebičích jinou aplikací a do kódu tohoto programu byly přidány formou datových proměnných. Příklad průběhu a výsledky výkonů podle normy ČSN EN 60050-131 v případě počítačového zdroje s pasivním PFC (Power Factor Correction) ukazují obrázky č. 6.2a a 6.2b.



Obr. 6.2a: Průběhy a spektra pro PC zdroj s pasivním PFC.

Činný výkon:	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} u_i \cdot i_i \text{ (W)}$	53,191
Zdánlivý výkon:	$S = U \cdot I \text{ (V} \cdot \text{A)}$	70,17
Jalový výkon (sinusové podmínky):	$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (var)}$	-9,959
Neaktivní výkon:	$Q_{\sim} = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ (var)}$	-45,767
Účinník:	$\lambda = \frac{P}{S} \text{ (-)}$	0,758
kosinus φ : (účinník v případě jedné harmonické)	$\cos \varphi = \cos(\varphi_U - \varphi_I) (^{\circ})$	0,99

Obr. 6.2b: Vypočtené hodnoty podle normy ČSN EN 60050-131 pro PC zdroj s pasivním PFC.

Výsledky této aplikace byly porovnány s výsledky jiné aplikace, která byla vyvinuta v minulosti na katedře. Testy dopadly v pořádku a výsledky byly shodné se vzorovou aplikací. Dále uvádím tabulku s konkrétním porovnáním výsledků

Tab. 2: Srovnání výsledků analyzátoru (zařízení A) s aplikací dříve vyvinutou na katedře (zařízení B)

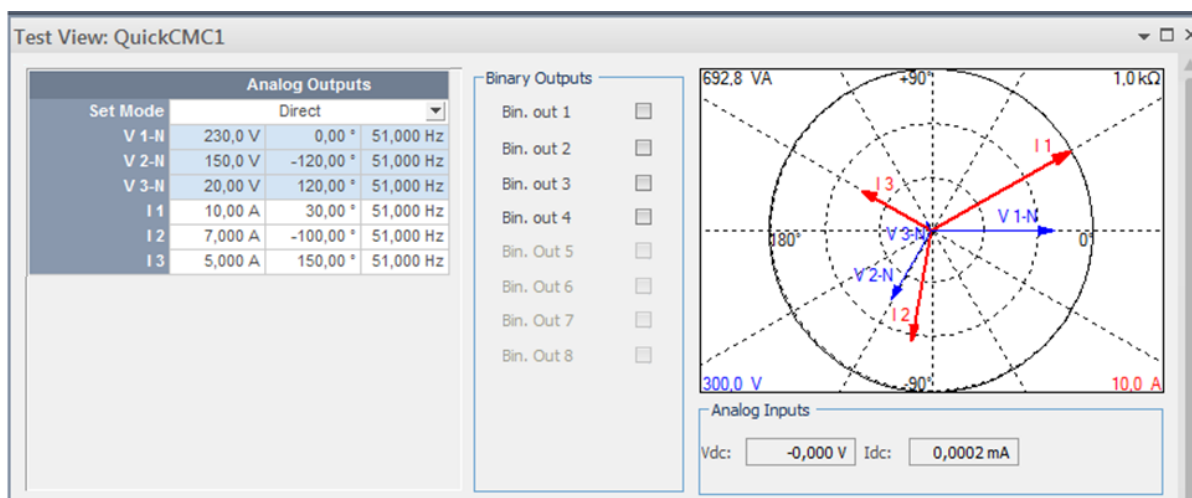
Spotřebič: PC zdroj s pasivním PFC								
zařízení	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	P (W)	S (V·A)	Q (var)	Q_{\sim} (var)	D (V·A)	λ (-)
A	231,388	0,303	53,191	70,170	-8,437	-45,767	44,859	0,758
B	231,388	0,303	53,191	70,170	-8,441	-45,767	44,982	0,758

6.3 Měřicí etalon Omicron CMC 256+

Ke generování přesných průběhů napětí a proudů byl použit generátor Omicron 256+ CMC. Tento generátor obsahuje mimo jiné čtyřfázový napěťový výstup (včetně nulového napěťového vodiče), dva trojfázové proudové výstupy (včetně dvou nulových proudových vodičů) a dvacet digitálních vstupů/výstupů. Z vybavení tohoto generátoru jsem využil jednu napěťovou fázi a jednu proudovou fázi ke generování zkušebních signálů.

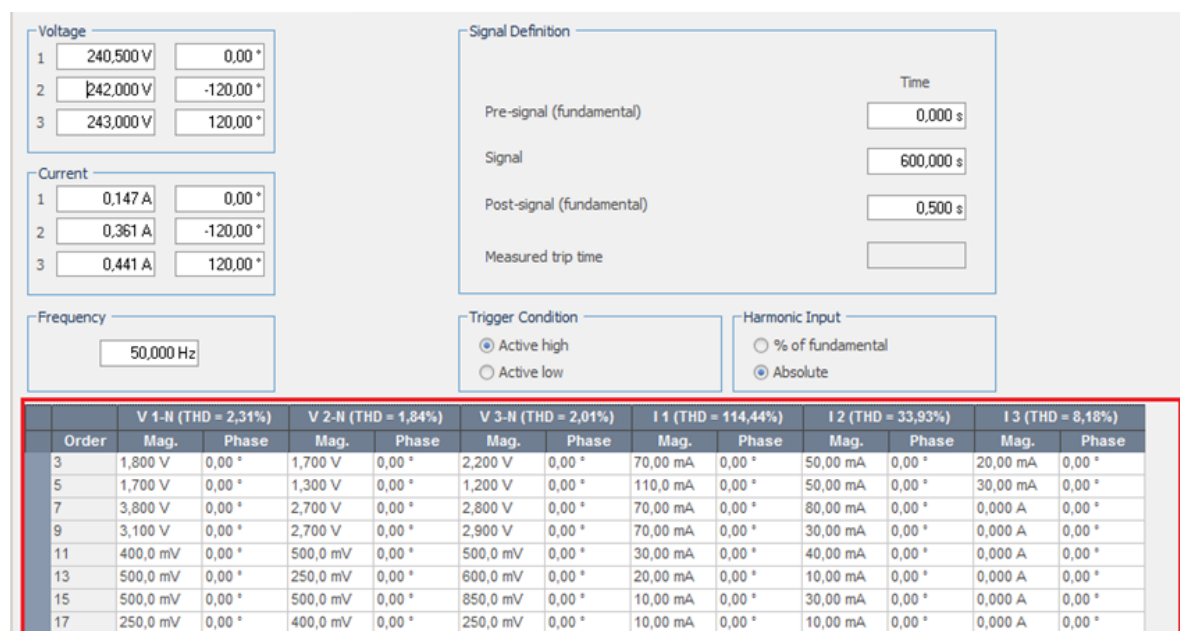
Omicron nemá vlastní ovládací panel, a proto se musí ovládat přes rozhraní Ethernet z počítače. Součástí instalačního balíku je řada ovládacích nástrojů, které slouží pro různá testování. Pro testování virtuálního měřicího přístroje byly použity dva z těchto modulů a to Quick CMC a Harmonics.

Quick CMC modul slouží k jednoduchému a rychlému nastavení trojfázového napětí a proudu. Lze nastavit proud a počáteční fázi v jednotlivých proudových větvích, napětí a počáteční fázi v jednotlivých napěťových větvích. Dále lze nastavit frekvenci všech větví dohromady.



Obr. 6.3a: Část ovládacího okna modulu Quick CMC.

Modul Harmonics slouží pro pokročilé generování trojfázových proudů a napětí s vyššími harmonickými složkami. V tomto modulu lze definovat pomocí tabulky různé vyšší harmonické složky pro každou fázi zvlášť. Každé vyšší harmonické složce se nastaví její řád, velikost (absolutně nebo v procentech základní harmonické) a počáteční úhel.



Obr.6.3b: Část ovládacího okna modulu Harmonics.

6.4 Výsledky testování online analýzy – měření z karty

Vytvořený virtuální měřicí přístroj byl testován pomocí generátoru Omicron CMC 256+. Virtuální měřicí přístroj byl nahrán do notebooku, který byl pomocí rozhraní USB spojen s měřicí kartou, která obsahovala modul napěťových vstupů a modul proudových vstupů. Napěťový modul NI 9225 obsahuje tři kanály dimenzované na hodnotu napětí 300 V efektivních. Maximální rychlost

vzorkování je 50 kS/s, šířka slova je 24 bitů, vstupní impedance 1 MΩ. Proudový modul NI 9227 obsahuje čtyři vstupy dimenzované na hodnotu proudu 5 A efektivních. Maximální rychlost vzorkování je 50 kS/s, šířka slova je 24 bitů, vstupní impedance 12 mΩ. Nebylo tedy potřeba přidávat do zapojení měřicí trafo, která by snižovala hodnoty napětí a proudu z důvodu měřicího rozsahu karty.

Výsledky naměřených veličin byly vizuálně kontrolovány jednak pomocí Omicronu a ještě pomocí analyzátoru ENA 330.11, který slouží k měření parametrů v elektrické síti. Výsledné hodnoty výkonových veličin, fázorový diagram U a I i grafy znázorňující průběhy a spektra byly totožné s výsledky stanovenými analyzátozem ENA. Níže uvedené tabulky zobrazují srovnání naměřených hodnot při různých měřeních.

Tab. 3: Srovnání naměřených výsledků Omicronu (zařízení A, považováno za referenční), analyzátoru ENA (zařízení B) a analyzátoru vyvinutého jako součást této bakalářské práce (zařízení C) pro sinusové signály $U = 230$ V a $I = 0,5$ A; $\varphi = 30^\circ$.

zařízení	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	P (W)	S (V·A)	Q_{\sim} (var)	λ (-)
A	230,00	0,5	99,593	115	57,50	0,866
B	229,98	0,5	100,00	115	58,00	0,866
C	229,97	0,5	99,57	114,95	57,43	0,866

Tab. 4: Srovnání naměřených výsledků Omicronu (zařízení A, považováno za referenční), analyzátoru ENA (zařízení B) a analyzátoru vyvinutého jako součást této bakalářské práce (zařízení C) pro sinusové signály $U = 230$ V a $I = 0,75$ A; $\varphi = -60^\circ$.

zařízení	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	P (W)	S (V·A)	Q_{\sim} (var)	λ (-)
A	230,00	0,750	86,25	172,50	-149,39	-
B	229,97	0,751	86,00	173,00	-149,00	0,501
C	229,97	0,750	86,15	172,40	-149,36	0,500

Tab. 5: Srovnání naměřených výsledků Omicronu (zařízení A, považováno za referenční), analyzátoru ENA (zařízení B) a analyzátoru vyvinutého jako součást této bakalářské práce (zařízení C) pro sinusový signál $U = 230$ V a periodický signál I (jednotlivé harmonické složky jsou v tab. č. 6).

zařízení	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	P (W)	S (V·A)	Q_{\sim} (var)	λ (-)
A	230	-	-	-	-	-
B	229,97	0,224	34,00	51,00	39,00	0,658
C	229,97	0,223	33,80	51,36	38,68	0,658

Tab. 6: Harmonické složky I .

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Velikost absolutní (mA)	147	70	110	70	70	30	20	10	10

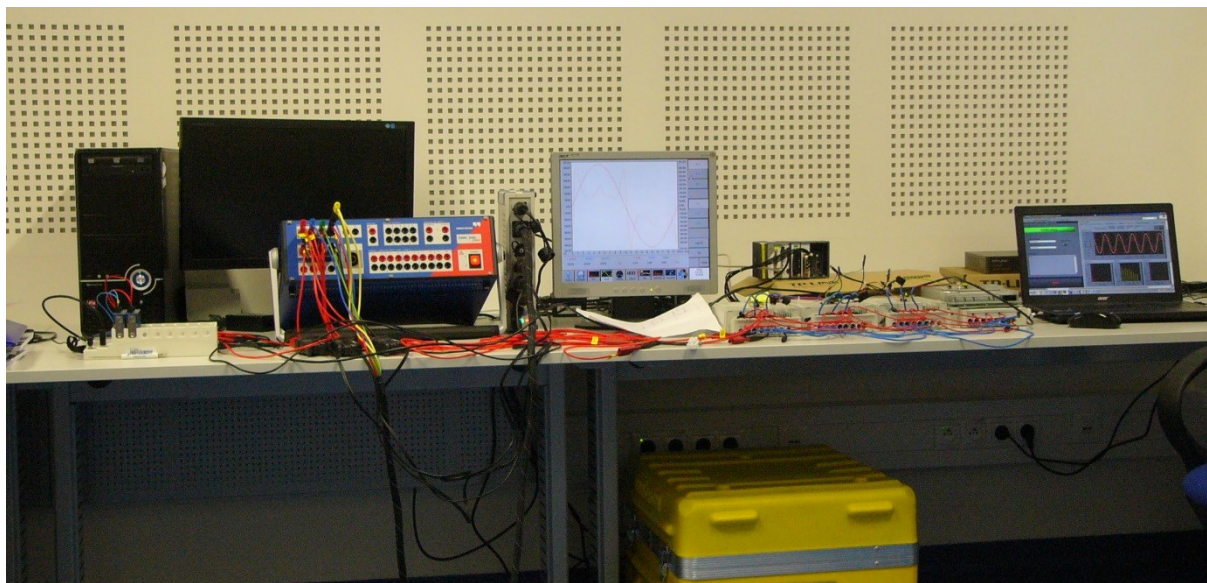
Tab. 7: Srovnání analyzátoru ENA (zařízení B) a analyzátoru vyvinutého jako součást této bakalářské práce (zařízení C) pro periodický signál U a I (jednotlivé harmonické složky jsou v tab. č. 8).

zařízení	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	P (W)	S (V·A)	Q_{\sim} (var)	λ (-)
B	200,29	0,223	31,00	45,00	32,00	0,700
C	200,32	0,223	31,29	44,65	31,85	0,701

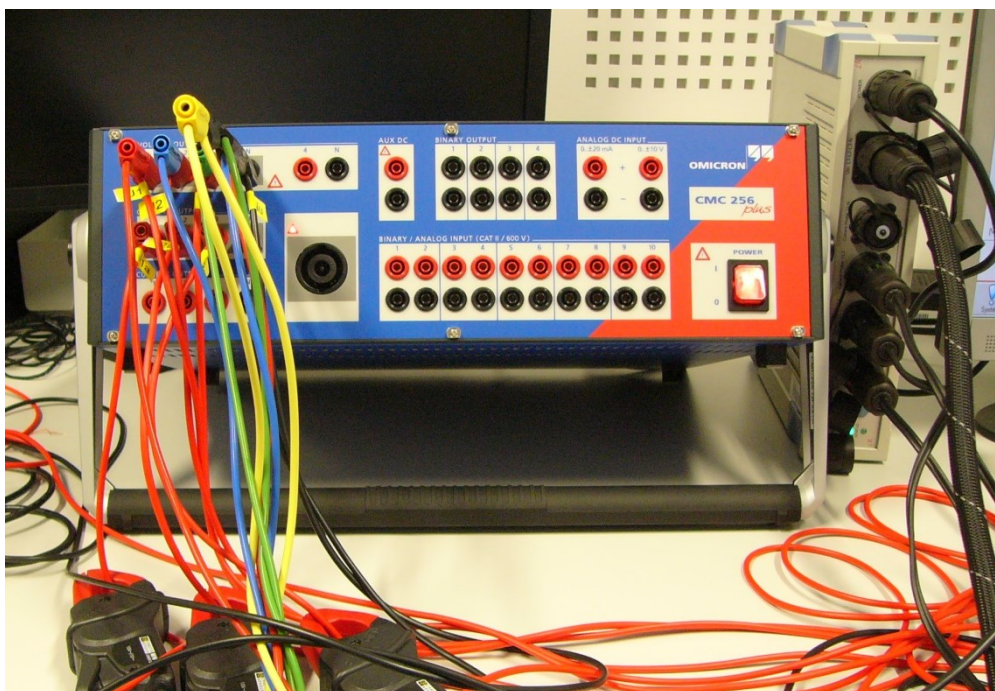
Tab. 8: Harmonické složky U I .

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.
U (V)	200	7	6	4	5	3	2
I (mA)	147	70	110	70	70	30	20

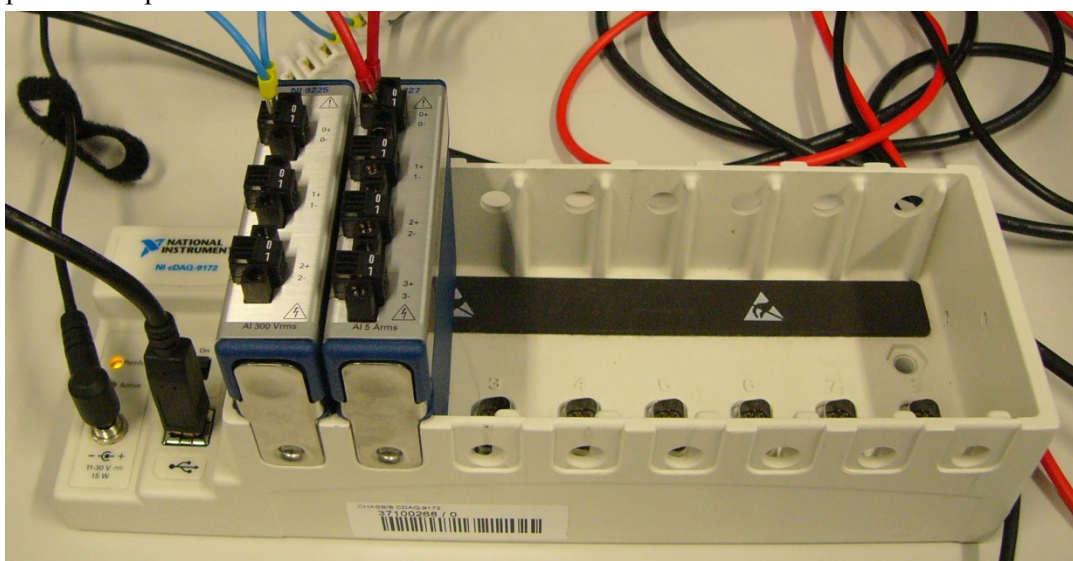
Z těchto naměřených hodnot je jasné vidět, že analyzátor navržený v této bakalářské práci měřil velmi přesně. To bylo dáno z velké části samotnými měřicími kartami, které jsou ve virtuální instrumentaci stěžejní s hlediska přesnosti měření. Níže jsou uvedeny obrázky z praktického měření.



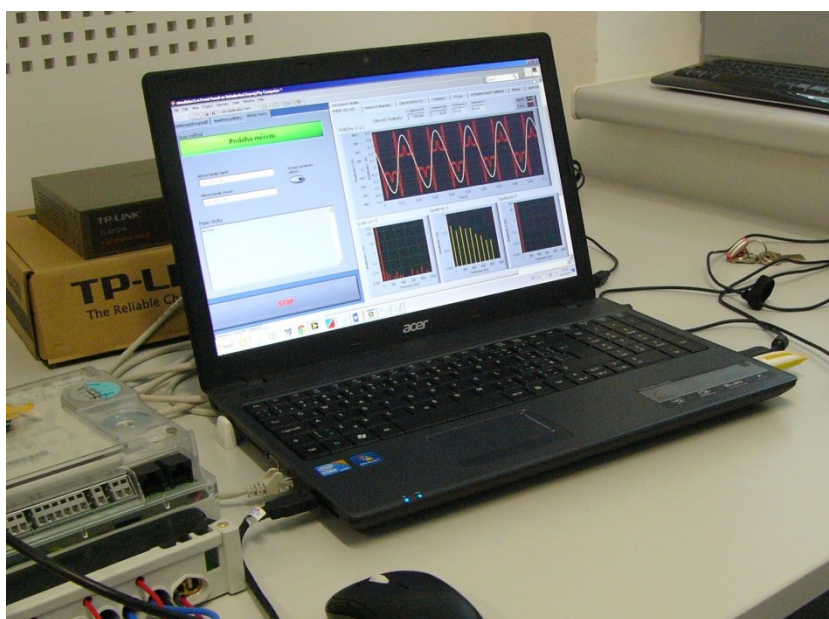
Obr. 6.4a: Ukázka pracoviště kde probíhalo měření pomocí karty.



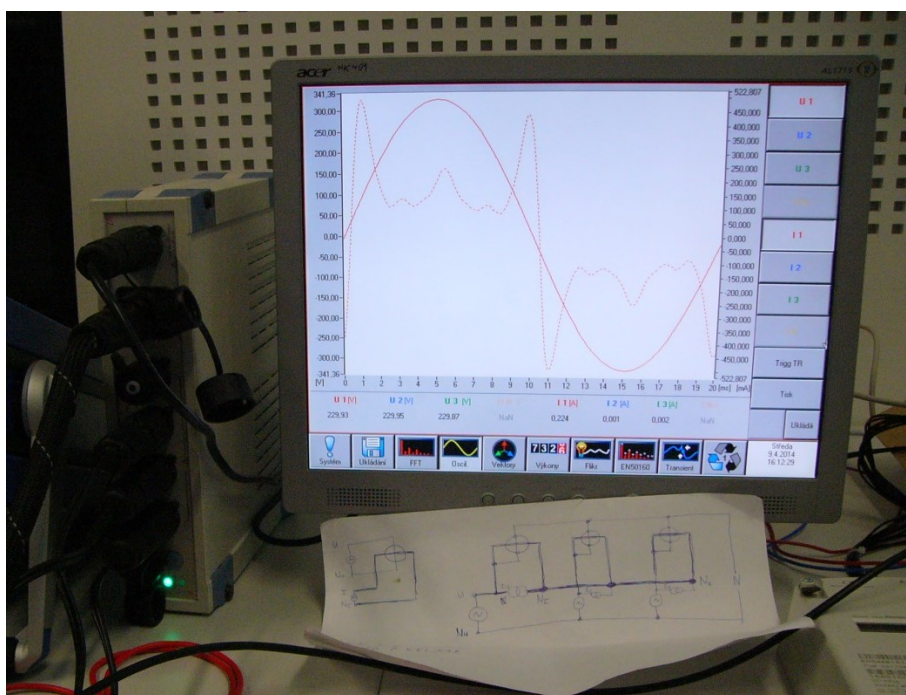
Obr. 6.4b: Detail na generátor Omicron CMC 256+, který sloužil k vygenerování zadaných průběhů proudu a napětí.



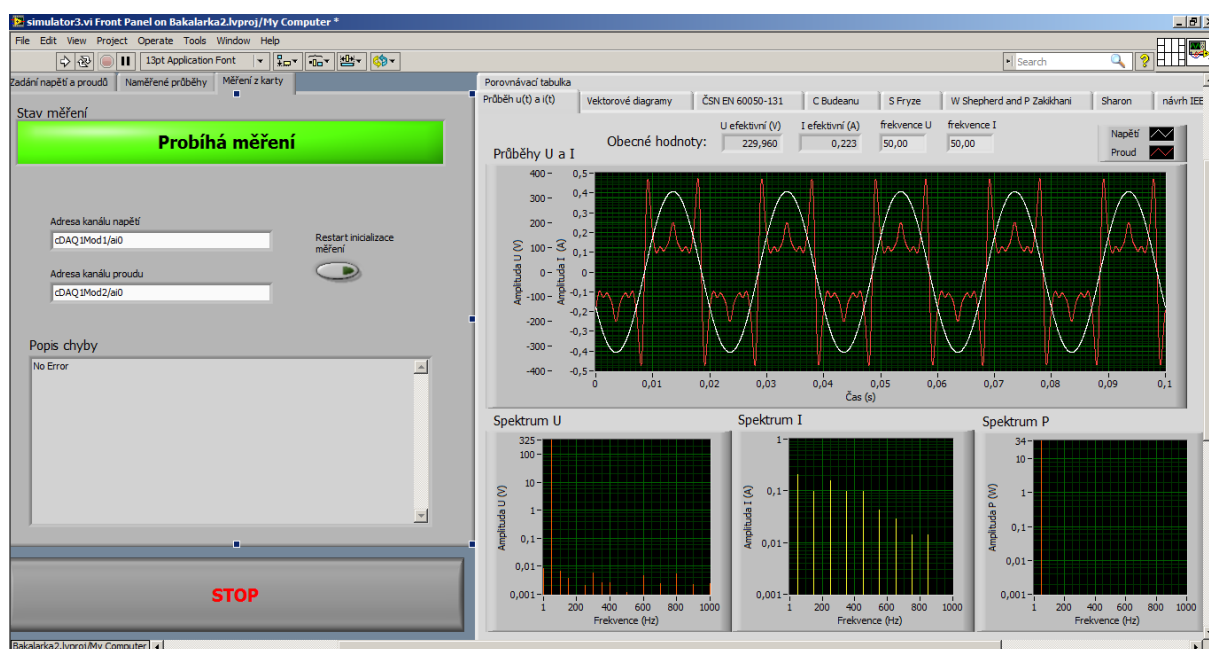
Obr. 6.4c: Detail na měřicí kartu připojenou k notebooku přes rozhraní USB. Obsahuje dva moduly pro měření proudu a napětí.



Obr. 6.4d: Detail na notebook se spuštěným virtuálním měřicím přístrojem. Zároveň tento notebook sloužil k ovládání generátoru Omicron.



Obr. 6.4e: Detail na analyzátor ENA 330.11, který sloužil pro kontrolní měření a na monitor který zobrazoval jím naměřené hodnoty.



Obr. 6.5f: Fotka pracovní plochy notebooku při konkrétním měření, průběhy a spektra

definice:	ČSN	Budeanu	Fryze	Shepherd a Zakikhani	Sharon
zdánlivý výkon:	S (VA) 114,947	S (VA) 114,947	S (VA) 114,947	S (VA) 114,946	S (VA) 128,505
činný výkon:	P (W) 99,57	P (W) 99,57		Sr (VA) 99,57	P (W) 99,57
Neaktivní/jalový výkon:	Q~(var) 57,433	Q (var) 57,433		Sx (VA) 57,433	Sq (VA) 81,236
Deformační výkon:		D (-) 0,313		Sd (VA) 0	

Veličina	kombinovaná	základní har.	harmonický	
Zdánlivý výkon	S (VA) 114,952	S1 (VA) 114,946	Sh(VA) 0	Sn(VA) 1,155
Činný výkon	P (W) 99,57	P1 (W) 99,57	Ph (W) 0	
Neaktivní výkon	N (var) 57,444	Q1 (var) 57,433	Dh (var) 0	

Obr. 6.5g: Fotka pracovní plochy notebooku při konkrétním měření, srovnávací tabulka

7. Závěr

Z této bakalářské práce je vidět, jak významný dopad má tvar signálu proudu a napětí na výpočet výkonových veličin v elektrickém obvodu. Zatímco při sinusových podmínkách si vystačíme s klasickým výkonovým trojúhelníkem tvořeným veličinami P , S , Q ; za periodických podmínek již musíme postupovat při výpočtu jinak. Existuje celá řada teorií, které se touto problematikou zabývají a navrhují určitá řešení. Některým z nich se věnuje i tato bakalářská práce.

Na základě těchto poznatků jsem vytvořil virtuální měřicí přístroj, který představoval můj přínos do této bakalářské práce. Měřicí přístroj slouží jako analyzátor výkonů v elektrické síti. Vývoj tohoto analyzátoru probíhal v prostředí LabVIEW, což je graficky orientovaný programovací jazyk, který slouží k programování měřicích aplikací. Styk analyzátoru s reálným světem zajišťují měřicí karty, které převádějí elektrické signály na číslcová data.

Vytváření měřicího přístroje pro mě bylo dobrou zkušeností v programování v grafickém prostředí LabVIEW. Naučil jsem se pracovat s celou řadou nových funkcí. Velká rozsáhlost projektu mi pomohla lépe se naučit spravovat větší části kódu, což obnáší vhodné používání sub VI a klástrů.

Analyzátor měří elektrické výkony za periodických podmínek a umožňuje porovnat výsledky vypočtené na základě různých teorií. Tento analyzátor je dále vybaven celou řadou dalších funkcí, jako jsou zobrazení okamžitých hodnot U a I v závislosti na čase, spektra veličin U , I a P , fázorové diagramy. Analyzátor byl náležitě testován, čímž se prokázala jeho funkčnost (viz kapitola 6).

Při testování jsem se nevěnoval výpočtům přesnosti měření neboť ta je dána konkrétními typy měřicích karet, případně dalšími zařízeními jako jsou například různé převodníky, které rovněž vnášejí další chyby a nejistoty do procesu měření.

Tato práce by mohla být dále rozvíjena přidáním dalších definic, které se týkají výpočtu výkonových veličin v elektrických obvodech za periodických podmínek a jejich implementací do samotného kódu měřicího přístroje. Dále by tento měřicí přístroj mohl být vybaven dalšími funkcemi, které by rozšiřovali jeho možnosti využití. Například výpočty parametrů kompenzačních prvků (cívky a kondenzátorů) pro zlepšení účinnosti, ukládání dat do souboru, rozšíření na třífázový systém elektrické sítě a podobně. Tyto úpravy by však již značně překračovaly rozsah této bakalářské práce.

Použitá literatura

1. *Výkony a účinník v deformované síti podle současných názvoslovných norem.* **Žáček, Jaroslav.** Praha : ERU 2008, 2008. VIII. konference „Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích“. stránky 1-13. ISBN 978-80-254-3821-3.
2. **ČSN EN 60050-131.** *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 131: teorie obvodů.* Praha : Český normalizační institut, 2005.
3. **Žáček, Jaroslav.** Účinník v teorii a praxi. *ELEKTRO*. 12/ 2004, stránky 4-6.
4. **Svensson, Stefan.** The significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities. *Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions*. [doktorská práce]. Göteborg, Švédsko : Chalmers Univerity of Technology, Department of Electric Power Engineering, 1999. pp. 1-127.
5. **IEEE Std. 1459-2010.** *IEEE Standart Definitions for the Measurment of Eletric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*. New York : Insititite of Eletrical and Electronics Engineers, Inc., 2010. ISBN 978-0-7381-6059-7 STDPD95967.
6. **Wittassek, Tomáš.** Virtuální instrumentace I. Ostarva : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012.
7. **ČSN EN 60375.** *Pravidla týkající se elektrických a magnetických obvodů.* Praha : Český normalizační institut, 2004.
8. **Kionka, Jaromír.** Teorie obvodů I. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1488-9.
9. **ČSN EN 62053-23.** *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) - Zvláštní požadavky - Část 23: Statické elektroměry pro jalovou energii (třídy 2 a 3).* Praha : Český normalizační institut, 2004.

Seznam příloh

Součástí této bakalářské práce je DVD s následujícím obsahem:

Adresář „program“ se zdrojovými kódy virtuálního měřicího přístroje. Celý program je seskupen pomocí projektového souboru s názvem „projekt“. Po jeho spuštění je v kořenovém adresáři umístěn soubor „main.vi“, který slouží ke spuštění aplikace.

Adresář „obrázky“ obsahující snímky plochy analyzátoru z praktického měření kapitoly 6.

Adresář „text_BP“ ve kterém je uložena tato bakalářská práce ve formátu docx a pdf.